

导弹火工品及其安全性

张 旭 叶 文 吕晓峰 邱立军 赵 曦 著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了导弹火工品及其安全性的相关知识。内容包括导弹火工品的概念、用途和分类、火工品药剂、典型导弹火工品、新型火工品技术、火工品固有安全性、火工品储存与转运安全、火工品操作安全等。为方便读者查阅专业词汇，书末还提供了导弹火工品常用词汇对照表及火工品安全国家军用标准列表。

本书可作为高等院校导弹工程相关专业的教材，也可供从事导弹火工品论证、研制、使用及管理人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

导弹火工品及其安全性 / 张旭等著. —北京：电子工业出版社，2018.10

ISBN 978-7-121-34952-2

I. ①导… II. ①张… III. ①导弹—火工品—安全性—研究 IV. ①E927

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 199167 号

策划编辑：张正梅

责任编辑：刘小琳 特约编辑：刘 炯

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：720×1000 1/16 印张：13.75 字数：277 千字

版 次：2018 年 10 月第 1 版

印 次：2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价：98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254757。

前 言

导弹技术是当今世界上高度复杂、高速发展的科学技术之一，它所取得的每项成就都是人类智慧的结晶。火工品是导弹武器系统的重要组成部分，是装有火炸药的小型爆炸元件或装置，能在外界不大的某种形式能量（机械能、热能或电能）激发下，发生燃烧或爆炸，获得某种化学效应或机械效应，如点燃火药、起爆炸药或作为某种特定的动力能源等。导弹火工品均装有含能材料，因具有敏感程度高、输出能量大及作用迅速等突出特点，其安全性受到高度关注。导弹火工品安全性既取决于自身固有特性，又与储存、运输、维护及使用等外部因素密切相关。导弹火工品及其安全性对导弹武器性能发挥有至关重要的影响和作用。

编写本书的目的主要是满足导弹专业本科生对导弹火工品及其安全性基本概念和理论知识的学习需求，同时又不至于过分专业化，以便非导弹专业学员宏观了解导弹火工品相关知识，为学习导弹系统专业知识打下基础。因此，本书在内容上既力求知识体系的完整性，又尽量反映当代导弹火工品的新技术、新概念和发展趋势，在内容上则力求深入浅出、图文并茂。

本书比较全面地介绍了导弹火工品及其安全性相关知识、现状和发展趋势。全书分为 6 章：第 1 章绪论，介绍导弹火工品概念、用途、分类、特点及主要战术技术要求；第 2 章火工品药剂，主要介绍起爆药、猛炸药、点火药及延期药的种类和特性；第 3 章典型导弹火工品，主要介绍点火类火工品、起爆类火工品、做功类火工品及索类火工品的结构组成、工作原理及性能特点；第 4 章新型火工品技术，主要介绍半导体桥起爆点火技术、直列式起爆点火技术、激光起爆点火技术及 MEMS 火工品技术；第 5 章火工品固有安全性，主要从药剂安全、安全设计及供电安全等方面对火工品安全性进行分析；第 6 章火工品勤务处理安全，主要介绍储存、转运及操作过程对火工品安全性的影响。书末还给出了中英导弹火工品常用词汇对照表，以及火工品安全国家军用标准列表。

本书是集体创作的成果。第 1~第 3 章由张旭编写，第 4 章由叶文编写，

第 5 章由吕晓峰、邱立军编写，第 6 章由邱立军、赵曦编写，附录由赵曦、张旭编写。

本书在编写过程中，参考了许多国内外文献资料 and 高等院校有关教材，在此对原作者表示衷心的感谢。导弹火工品及其安全性涉及的基础理论相当广泛，导弹火工品技术发展日新月异，限于编者的水平，本书在编写时，虽力求全面、系统，仍难免存在错误和不当之处，恳请各位读者提出宝贵意见。

作 者
2018 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导弹概述	1
1.2 火工品概念	4
1.3 导弹火工品用途	5
1.3.1 点火作用	7
1.3.2 起爆作用	11
1.3.3 做功作用	15
1.4 导弹火工品分类	16
1.5 导弹火工品特点	18
1.6 导弹火工品战术技术要求	19
本章小结	21
思考题	21
第 2 章 火工品药剂	22
2.1 起爆药	22
2.1.1 起爆药特性	22
2.1.2 几种常用起爆药	28
2.1.3 对起爆药的要求	40
2.2 猛炸药	41
2.2.1 太安	41
2.2.2 黑索金	43
2.2.3 奥克托金	45
2.2.4 特屈儿	47
2.3 点火药	49
2.4 延期药	53
本章小结	56
思考题	56
第 3 章 典型导弹火工品	57
3.1 点火类火工品	57
3.1.1 烟火剂点火器	58

3.1.2	点火发动机	62
3.1.3	隔板点火器	63
3.2	起爆类火工品	64
3.2.1	雷管	64
3.2.2	导爆药柱	87
3.2.3	传爆管	90
3.3	做功类火工品	94
3.3.1	燃气发生器	94
3.3.2	电爆管	97
3.3.3	作动装置	98
3.3.4	点式分离火工装置	103
3.3.5	线型分离火工装置	110
3.4	索类火工品	115
3.4.1	导火索	116
3.4.2	导爆索	120
	本章小结	125
	思考题	126
第4章	新型火工品技术	127
4.1	半导体桥起爆点火技术	127
4.1.1	结构组成	127
4.1.2	工作原理	130
4.1.3	主要特点	132
4.1.4	典型应用	133
4.2	直列式起爆点火技术	136
4.2.1	系统组成	136
4.2.2	冲击片雷管	138
4.2.3	冲击片点火管	143
4.3	激光起爆点火技术	146
4.3.1	激光起爆点火机理	146
4.3.2	激光点火技术	147
4.3.3	激光起爆技术	151
4.4	MEMS 火工品技术	154
4.4.1	MEMS 火工器件特点	155
4.4.2	MEMS 火工技术应用	156
	本章小结	160
	思考题	160

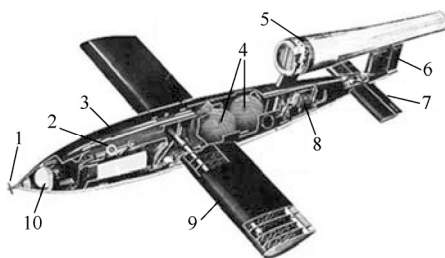
第 5 章 火工品固有安全性	161
5.1 火工品药剂安全.....	161
5.1.1 火工品药剂的不安定因素	161
5.1.2 高安全火工药剂	165
5.2 火工品安全设计.....	167
5.2.1 安全编码技术.....	168
5.2.2 抗杂散电流技术.....	169
5.2.3 抗静电技术.....	170
5.2.4 抗射频技术.....	173
5.3 火工品供电安全.....	175
5.3.1 火工品点火电路.....	176
5.3.2 引信供电电路.....	179
本章小结	181
思考题	181
第 6 章 火工品勤务处理安全	182
6.1 储存安全	182
6.1.1 温度影响及效应	182
6.1.2 湿度影响及效应	185
6.1.3 其他因素影响及效应	187
6.2 转运安全	188
6.2.1 振动影响及效应	189
6.2.2 冲击影响及效应	189
6.3 操作安全	190
6.3.1 静电影响及效应	191
6.3.2 射频影响及效应	196
本章小结	203
思考题	203
附录 A 中英导弹火工品常用词汇对照表	204
附录 B 火工品安全国家军用标准列表	210
参考文献	211

第 1 章 绪 论

1.1 导弹概述

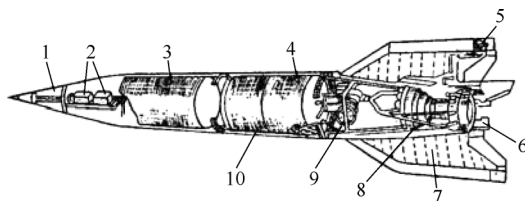
导弹是载有战斗部，依靠自身动力装置推进，由制导系统导引、控制其飞行轨迹，并导向目标的飞行器。导弹依靠火箭发动机推进，也可由空气喷气发动机或组合型发动机提供飞行动力。

最早投入作战使用的导弹，主要有第二次世界大战后期德国研制的 V-1 飞航式导弹（图 1-1）和 V-2 弹道式导弹（图 1-2）。V-1 导弹以喷气发动机为动力，采用简易制导系统，由自主式磁性陀螺和机械装置对飞行高度、状态和弹道进行控制。



1—风轮；2—引信；3—战斗部；4—金属丝缠绕的球形压缩空气瓶；5—脉动式空气喷气发动机；
6—方向舵；7—升降舵；8—自动驾驶仪；9—弹翼；10—磁罗盘。

图 1-1 V-1 飞航式导弹



1—战斗部；2—制导系统；3—酒精贮箱；4—液氧贮箱；5—空气贮；6—燃气贮；
7—尾翼；8—液体火箭发动机；9—涡轮泵；10—弹体。

图 1-2 V-2 弹道式导弹

V-2 导弹装有单级液体火箭发动机，采用无线电遥控制导方式。

从 20 世纪 50 年代初开始，导弹进入了快速发展期，导弹武器的型号、数量

及生产规模均有很大的发展和变化。美国着重发展洲际弹道导弹，并在潜射弹道导弹方面领先，主要型号有“红石”(1950 年)、“大力神”(1955 年)、“民兵”(1958 年)弹道导弹，以及“北极星 A1”(1952 年)、“北极星 A2”(1958 年)潜地战略导弹等。俄罗斯除发展弹道导弹外，也比较重视反舰导弹的研究，是这一时期拥有反舰导弹型号和装备数量最多的国家。弹道导弹主要型号有“飞毛腿”(1950 年)战术地地弹道导弹、“短剑”(1958 年)战略弹道导弹，反舰导弹主要型号有“狗窝”(1950 年)空舰导弹、“沙道克 A”(1951 年)潜舰导弹、“冥河”(1959 年)舰舰导弹等。

进入 20 世纪 60 年代，由于科学技术的发展和战场条件的变化，导弹进入了改进性能、提高质量发展时期。特别是 1967 年第三次中东战争中，埃及用苏制“冥河”导弹一举击沉以色列“埃拉特”号驱逐舰后，反导技术得到发展，反舰导弹武器研制重点则转向如何改进突防能力和提高生存力上。这一时期各类导弹均进行了多次改型，性能均有明显提高。

70 年代以来，随着先进的设计思想及科学技术的广泛应用，导弹武器步入了全面更新时期，各类新型号导弹不断推出，如弹道导弹中的“SS-20”“潘兴”“MX”等；巡航导弹中的“AGM-86B”和“战斧”系列；防空导弹中的“罗兰特”“响尾蛇”“爱国者”“标准”等；空空导弹中的“不死鸟”“魔术 R550”；反舰导弹中的“飞鱼”系列和“捕鲸叉”系列；反坦克导弹中的“海尔法”等。飞鱼(Exocet) MM38 反舰导弹如图 1-3 所示。

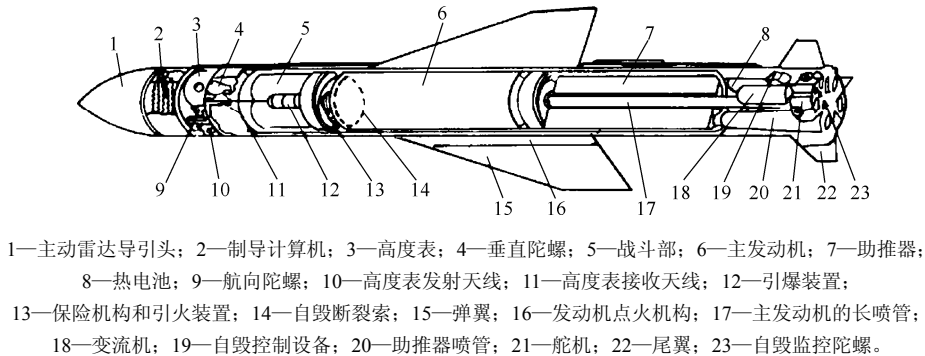


图 1-3 飞鱼(Exocet) MM38 反舰导弹

在现代战争中，导弹武器越来越发挥着重要作用。从 20 世纪 60 年代的越南战争，80 年代的英阿马岛战争，90 年代的海湾战争，到现在的叙利亚战争，都一再说明，在现代常规战争中，导弹已成为左右战场形势、决定战争胜负的一个重要因素。

导弹是一种飞行武器，虽然各类导弹作战用途不尽相同，却有着基本一致的

结构和组成部分，主要由弹体、制导、推进、战斗部和电气 5 个分系统组成。

1. 弹体

弹体即导弹的主体，是由舱段、空气动力面及弹上机构连接而成的。弹体是外力的主要承受者，它的功能是使导弹的各部分组合成一个整体，并使导弹形成良好的气动外形。

舱段连接成的主体称为弹身，其功用是安装战斗部、制导设备、动力装置及电气设备等，并将弹翼、舵面等部件连成一个整体。弹身是导弹的最主要的受力和承力部件。

空气动力面包括产生推力的弹翼、产生操纵力的舵面及保证稳定飞行的安定面（尾翼）。由于弹道式导弹的弹道大部分在大气层外，一般不需要弹翼或根本没有空气动力面。

2. 制导系统

导弹的制导系统是导引和控制导弹飞向目标的仪器、装置和设备的总称，主要由导引系统和控制系统两部分组成。导引系统用于测量导弹和目标运动参数（如导弹运动方位、导弹和目标的相对距离、目标的运动参数等），产生导弹飞行控制指令；控制系统则用于操纵导弹改变飞行姿态，控制导弹按要求的方向和弹道飞向目标。

3. 推进系统

推进系统，又称为动力装置，用于为导弹发射和飞行提供推动力。常用的动力装置主要有火箭发动机（固体、液体发动机）、空气喷气发动机（涡轮喷气、涡扇喷气、冲压喷气发动机）、火箭冲压发动机及其他组合式发动机等。

推进系统又有助推器和主发动机之分。助推器用来使导弹在发射后快速获得较大速度，多采用固体火箭发动机；主发动机则可使导弹能在较长的时间内续航飞行，有多种工作体制。例如，法国“飞鱼”（MM38）导弹采用的是固体火箭助推器和固体火箭发动机，俄罗斯的“马斯基特”导弹则采用固体火箭助推器和液体冲压组合发动机，而弹道导弹采用多级发动机模式。

4. 战斗部系统

战斗部系统包括引信装置和战斗部两大部分，因此战斗部系统也称引信战斗部系统，简称引战系统。引信的功用就是保证战斗部在最恰当的时间和地点爆炸，主要有近炸引信、触发引信及指令引信等。战斗部则是导弹的有效载荷，用来摧毁目标，是直接完成预定战斗任务的装置。根据作战任务的不同，战斗部又有爆破战斗部、聚能爆破战斗部、半穿甲战斗部、破片战斗部、云爆战斗部、集束战斗部、化学战斗部及核战斗部等多种类型。对于弹道导弹而言，由于战斗部系统一般安装在导弹的头部，通常又称为弹头。

5. 电气系统

电气系统是导弹的重要组成部分，主要由电源（电池组）、配电和变电装置、弹上电缆网、电气成件等组成。电气系统将弹上各分系统连成一个有机整体，实现弹上设备的检查和导弹发射；能适时、正确、安全可靠地为弹上各分系统用电设备提供电能；传递各种指令和信号，保证弹上各用电设备之间互相配合及协同工作，共同完成战斗任务。

1.2 火工品概念

火工品是一类小型、较敏感、装有火炸药的爆炸元件。它能在外界不大的某种形式能量（机械、热或电能）的激发下，发生燃烧、爆炸等化学反应，并用其所释放的能量以获得某种化学物理效应或机械效应，如点燃火药、起爆炸药或作为某种特定的动力能源等。换言之，火工品为装有火药或炸药，受外界刺激后产生燃烧或爆炸，以引燃火药、引爆炸药或做机械功的一次性使用的元器件和装置的总称，它包括火帽、底火、点火管、延期件、雷管、传爆管、导火索、导爆索，以及爆炸开关、爆炸螺栓、启动器、切割索等。它常用于引燃火药、引爆炸药，还可作为小型驱动装置，用以快速打开活门、解除保险及火箭级间分离等。总体来说，火工品是点火—传火、起爆—传爆系统及完成特殊功能的元器件或装置的总称，是武器弹药中不可分割的子系统，同时又是能够独立做功的动力源产品。它是各系统作用的始发元件，又是最敏感产品，因此，它的安全性、可靠性和先进性将直接影响各系统的性能和发展。火工品装有火工药剂，是火炸药的制成品，它是一个独立的元件或装置。

目前，世界各国对火工品还没有一个统一的标准定义。虽然各国在表述上不尽一致，但其含义是大致相同的，一般从结构、性能、用途等方面来加以定义。

兵器工业科学技术词典编辑委员会在“火工品与烟火技术火工品”章节中关于火工品是这样描述的：“火工品是一类小型、较敏感、装有火炸药的爆炸元件。它能在外界不大的某种形式能量（机械、热或电能）的激发下，发生燃烧、爆炸等化学反应，并用其所释放的能量以获得某种化学物理效应或机械效应，如点燃火药、起爆炸药或作为某种特定的动力能源等。”

《火工品术语》（WJ 1624—1994）则将火工品定义为：“装有炸药的小型元件或装置，受一定的初始冲能作用即可燃烧或爆炸，以产生预期的功能。”这一定义中的“炸药”即火工品药剂，主要包括起爆药、猛炸药、火药、烟火药等，可根据不同火工品的具体要求加以选用。例如，为了加强输出功能，起爆类火工品（如雷管）加入了猛炸药；而有些火工品（如导爆索、导爆管）则只装猛炸药这一单

一药剂。定义中的“初始冲能”是指施加于火工品药剂的最初外界冲能，通常有热冲能、机械冲能（撞击、摩擦、针刺等）、电冲能、光冲能等几种形式。产生的预期功能有诸如爆炸、燃烧或做功等功能。

有些火工品结构相对简单，如普通的火帽、底火等引燃火工品；而有些火工品则比较复杂，如先进的飞片式雷管、半导体桥火工品及基于 MEMS（微机械电子系统）的火工品元件等。

总之，火工品都是一些小的炸药元件，具有较高的感度，能由各种类型的很小外界能量激发，释放大功率能量，起引燃、引爆作用或产生特种效应。火工品种类繁多，用途广泛，体积虽小，地位却很重要，在导弹武器系统中发挥着不可替代的作用。

1.3 导弹火工品用途

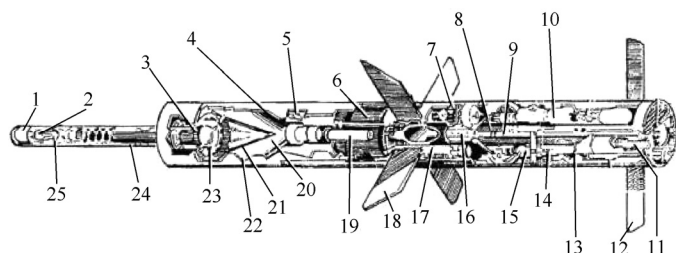
火工品是导弹武器系统重要的组成部分，在导弹攻击的各阶段关键点上都发挥着关键性作用。下面以“陶 2A”式反坦克导弹为例，简要介绍导弹火工品的主要用途。

“陶”式导弹是由美国原休斯飞机公司、现休斯导弹系统公司（Hughes Missile Systems）于 1962 年开始研究，1970 年进入美国陆军地面部队服役的第二代重型反坦克导弹，也是世界上产量最大、装备国家最多的反坦克导弹，曾在越南、中东和两伊战争中大量使用。

“陶 2A”导弹长 1177mm，弹径 152mm，弹重 21.5kg，射程 65~3750m，破甲厚度 1030mm。“陶 2A”配用双级串联战斗部，可以击毁披挂反应装甲的主战坦克。导弹本身在结构上，从前到后分为 5 个舱段——战斗部舱、电子设备舱、主发动机舱、中舱和尾舱，各舱段之间通过环形凹槽连接。除发动机壳体及气瓶使用钢材外，弹体大部分零部件采用铝合金制成。“陶”式导弹外形如图 1-4 所示，“陶 2A”式导弹结构如图 1-5 所示。



图 1-4 “陶”式导弹外形



1—碰合开关；2—战斗部；3—碰合开关；4—保险机构；5—集成电子单元；6—加速发动机；7—陀螺；
8—起飞发动机辅助单元；9—起飞发动机；10—气瓶；11—制导导线管；12—空气舵面；13—舵面推杆；
14—舵面弹簧；15—控制执行机构；16—“C”电池；17—“A”电池；18—弹翼；19—导火索；20—战斗部；
21—药型罩；22—压制装药；23—电子延时机构；24—外伸探头；25—压制装药。

图 1-5 “陶 2A” 式导弹结构

1. 战斗部舱

基本型战斗部舱装有空心装药聚能破甲战斗部和触发引信。战斗部由风帽、内罩、主炸药、传爆药、药型罩及壳体组成。主炸药为奥克托尔高能炸药，重 2.431kg，其成分为黑索金 75.4%、梯恩梯 24.6%，用真空振动精密铸装法装入战斗部壳体，传爆药柱采用压制成形。战斗部静破甲能力：45 号钢靶板，穿透厚度 586mm；复合靶板，穿透厚度 505mm。触发引信采用 M114 全保险电容式机电引信，包括由风帽和内罩构成的头部触发开关、雷管、启动电源、保险器及保险执行机构等。启动电源为装在电子舱内靠弹上蓄电池充电的电容器，引信解除保险距离为 46~65m。当命中目标时，弹头碰合开关碰合，雷管起爆。改进型战斗部的头部装有长度不同的外伸式触发探头，以提供远距引爆能力。

2. 电子设备舱

电子设备舱装有一系列信号处理电子线路，用于对来自陀螺仪的导弹姿态信号和来自机载/地面控制系统的导线指令信号进行比较，形成控制舵机工作的方波信号，传给中舱舵机并控制 4 片尾舵运动，操纵导弹产生俯仰、偏航和滚转运动。

3. 主发动机舱

主发动机舱内装 1 台 K41 固体火箭发动机，用以使导弹加速飞行。该发动机由燃烧室壳体、喷管座、喷管、主药柱、点火管、挡药板、密封圈、发火器、引燃药盒、点火药柱和药绳组成。两个喷口分别位于弹体中部两侧，单根主装药柱为平台型浇铸双基药，工作时间为 1.6s，燃料重量 2.58kg，点火管纵贯燃烧室中心，内装发火器、引燃药盒和缠有药绳的点火药柱，依次引燃主装药。

4. 中舱

中舱装有采用冷却氮气驱动的反作用式三自由度陀螺仪、气动舵机及作为弹

上电源的 3 个蓄电池。陀螺仪测量导弹倾斜/偏航角误差，并将其送往电子设备舱处理，转换成弹体倾斜稳定/偏航阻尼指令信号，与来自机载/地面控制系统的导线指令信号进行比较，形成控制舵机工作的方波信号，传给尾舱舵机并控制 4 片尾舵偏转，操纵导弹产生所需的俯仰、偏航和滚转运动。舵机装置为采用脉冲调宽工作原理的冷气式舵机，由气瓶（内装氦气）、开瓶器、减压器、4 个电磁阀和 4 个作动器组成，发射时陀螺点火具点火，打开气瓶，放出气体，启动陀螺转动并达到额定速度。4 个作动器通过拉杆、弹簧分别控制着 4 个控制舵面偏转。弹上 3 个蓄电池为红外光源、电子设备舱、引信解除保险、主发动机点火和开启舵机气瓶提供电源。

5. 尾舱

尾舱内部中央装有 1 台固体火箭发动机，在其四周分布有导线盒、红外光源、冷气瓶等。尾舱外部则是 4 片控制舵面。该发动机作为助推器用于导弹发射，使导弹获得飞离发射筒的能量，其由燃烧室、喷管、药柱和点火器组成，采用 4 根 M7 螺压双基管状药柱，工作时间 0.044s，燃料重量 0.545kg。向电子设备舱传输机载/地面控制指令信号的 2 根镀铜钢丝导线，一端分别缠绕在装于尾舱的 2 个导线盒的线管上，其另一端则穿过弹体上的孔连到导弹发射筒前端的切线器上，导线长度与其最大射程基本相同，当导弹飞完全程后，切线器发火将导线切断。

由导弹结构可以看出，火工品分布在“陶”式导弹的各个主要子系统之中，在导弹的陀螺系统启动、起飞发动机点火、加速发动机点火、战斗部起爆控制乃至制导导线切断等各环节上，都发挥了不可替代的重要作用。由于火工品具有质量轻、体积小、工作电源小、输出能量大、作用迅速、成本低、可靠性高等一系列突出优点，因此在导弹武器上得到了广泛的应用。

下面介绍火工品在导弹武器系统中的典型用途。

1.3.1 点火作用

导弹的动力装置（亦称推进系统）是产生推力推动导弹运动的整套装置，它是导弹的重要组成部分。目前，导弹用的发动机按自带氧化剂或利用空气中氧作氧化剂，分为火箭发动机和空气喷气发动机两大类。火箭发动机同时自带燃料和氧化剂，不依靠空气，所以它可以在大气层和无大气的空间工作。火箭发动机按推进剂的物理状态不同，又分为液体火箭发动机和固体火箭发动机。空气喷气发动机本身只带燃料（燃烧剂），因此，空气喷气发动机只能在稠密的大气层中工作。根据空气增压方式不同，空气喷气发动机又分为涡轮喷气发动机和冲压发动机。近几年来出现的火箭/冲压喷气发动机，是一种基本上属于空气喷气发动机类型的新型导弹动力装置。导弹用发动机分类如图 1-6 所示。

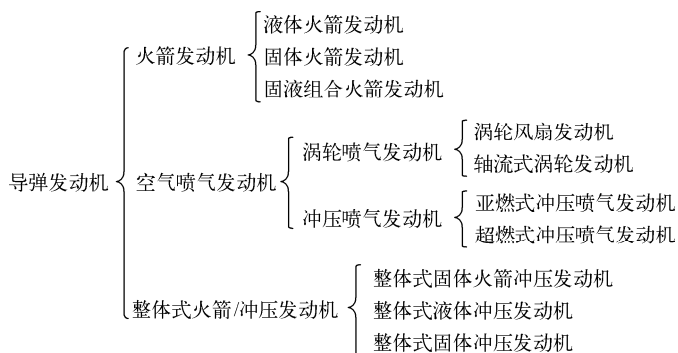


图 1-6 导弹用发动机分类

1. 液体火箭发动机点火

液体火箭发动机按照推进剂输送形式不同分为挤压式和涡轮泵式两类。通常，挤压式液体火箭发动机用在小型近程导弹上，而涡轮泵式液体火箭发动机则主要在大型的、中远程导弹上使用。

下面以涡轮泵式液体火箭发动机为例简述液体火箭发动机的工作原理，如图 1-7 所示。

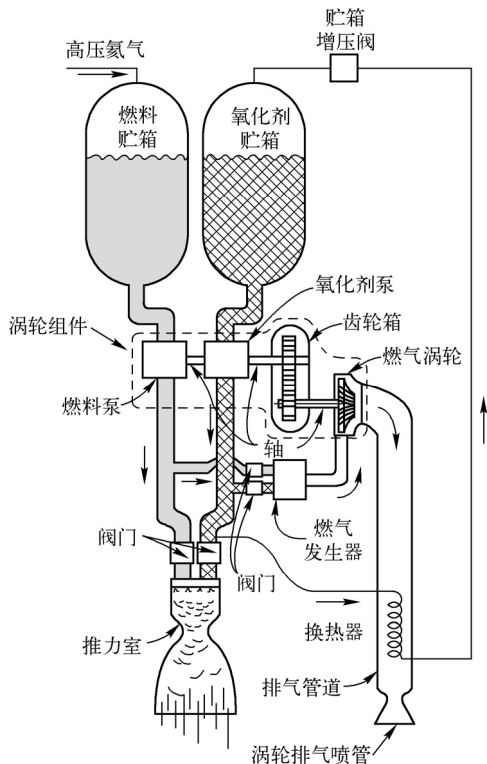


图 1-7 涡轮泵式液体火箭发动机示意图

推进剂贮箱储存着发动机工作期间所消耗的推进剂。发动机启动和正常工作过程中，推进剂供应系统不间断地将贮箱中的推进剂按照设计的压力和流量输送到推力室中去。推力室是将推进剂的化学能转化为喷气动能并产生推力的组件，它由喷注器、燃烧室和喷管组成。如果采用非自燃推进剂，在推力室内还装有点火装置。液体推进剂通过喷注器喷入燃烧室，经雾化、蒸发、混合和燃烧过程生成高温高压燃气，经喷管加速形成高速气流从喷管排出而产生推力。

发动机启动时，常用固体火药启动器为涡轮提供初始工质，发动机在持续稳定工作期间，则用和燃烧室类似的燃气发生器作为提供涡轮工质的组元，这些器件均为火工品。此外，为保证发动机按照一定的程序启动、关机、稳定工作和转变工作状态，在系统中设置了自动活门和自动调节器等组件，如启动活门、关机活门、保险活门、加泄活门、溢出活门和单向活门等，许多也都采用了基于火工品的电爆活门。

2. 固体火箭发动机点火

固体火箭发动机使用固体推进剂，推进剂被做成一定的形状装填或直接浇注在燃烧室中。推进剂（亦称装药）直接在燃烧室中燃烧，形成高温、高压燃气（燃烧产物）并从喷管喷出，产生推力。固体火箭发动机由燃烧室、喷管、药柱和点火装置等部分组成。

固体火箭发动机的药柱可以是自由装填的，即首先将推进剂按设计要求加工成一定形状的药柱装填到燃烧室内，为此需要用药柱支承装置。对于浇注推进剂的固体火箭发动机，不需要支撑装置，装药与燃烧室壁黏结在一起。图 1-8 所示的固体火箭发动机是浇注式的。

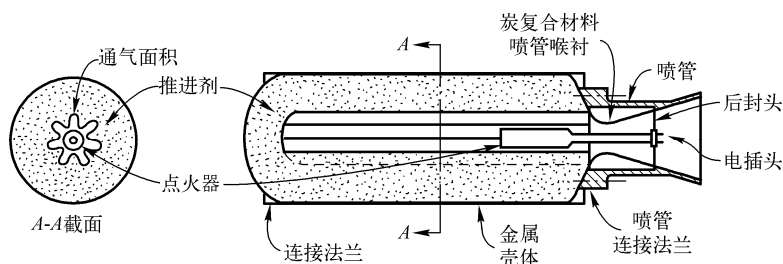


图 1-8 固体火箭发动机简图

固体火箭发动机启动点火一般是在发动机头部装一个点火装置（也称点火器），也有装在其他空隙处的。启动时，通电引燃点火器内的热敏药，热敏药再引燃加强药，加强药再引燃点火药，产生一定压强的燃气，其数值相当于主装药燃烧压强的 $1/4 \sim 1/3$ ，约为 1MPa 。点火药的燃气很快把药柱表面包围，药柱被加热并点燃。燃气经喷管膨胀，高速排出，产生推力。

3. 涡轮喷气发动机点火

目前在射程比较大的地对地、空对地及飞航式导弹上应用了涡轮喷气发动机。图 1-9 是典型的轴流式涡轮喷气发动机示意图。其中第 I 部分是进气道，其主要作用是，整理进入发动机的空气流，消除紊乱的涡流，使气流沿整个压气机进口处有比较均匀一致的压力分布，从而保证压气机有良好的工作条件。第 II 部分是轴流式压气机。在发动机匣上装有静止叶片，在压气机轴上装有转子叶片，由涡轮带动压气机轴高速旋转。由于转子叶片与静止叶片的相对运动，迫使进气道来的空气不断地压缩增压（空气压强增加 5~30 倍）。空气的流速不断下降，温度升高，压强增大。空气被压缩增压后进入第 III 部分——燃烧室，一部分空气（20%~30%）与喷嘴喷入燃烧室的燃油混合、雾化、燃烧，变成了具有很大能量的高温高压燃气。第 IV 部分是涡轮。燃气带动涡轮高速转动，涡轮带动压气机和连接在轴上的其他附件（如发电机、燃油泵等）转动。在涡轮后面又设置了加力燃烧室，这就是发动机的第 V 部分。通过加力燃烧，气流进入第 VI 部分——喷管。当飞行速度不高时，涡轮喷气发动机的喷管一般采用收敛形。当飞行速度较高时，为提高发动机效率，采用超声速拉瓦尔喷管。气流在喷管内继续膨胀加速，而后高速喷出。

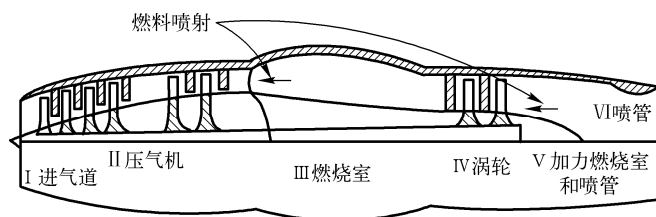


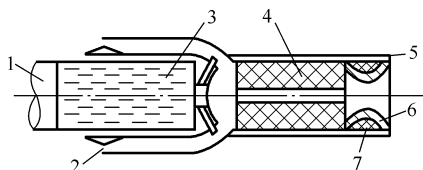
图 1-9 轴流式涡轮喷气发动机示意图

在导弹涡轮喷气发动机工作过程中，置于燃烧室内，用于点燃雾化后的混合燃油的元件，通常称为烟火点火器，是一种典型的发动机点火火工品。

4. 整体式冲压发动机点火

整体式冲压发动机见图 1-10。它的助推器与液体燃料冲压发动机共同使用一个燃烧室。当助推器的固体装药燃烧结束之后，腾出的燃烧室空间再作为冲压发动机的燃烧室，剩下的部分就是液体燃料冲压发动机。整体式液体冲压发动机的工作过程是，首先助推器点火工作，到助推器工作结束时，已把导弹加速到冲压发动机能开始工作的速度。这时进气道的堵盖被打开，同时使助推器尾喷管脱落机构工作，把助推器的喷管抛掉，冲压发动机的燃料活门打开，空气进入燃烧室。燃烧室是空气与燃油混合燃烧，生成燃气的地方。燃烧室一般制成圆筒体，里腔装有预燃室、燃油喷嘴环、点火器及火焰稳定器等组件。从进气道流入的空气，与燃油喷嘴喷出的雾化燃油混合，形成可燃的混合气体，

符合着火条件后由点火器点燃。发动机启动时，点火器工作，放射火花点燃预燃室中的燃气，形成一个点火“火炬”，然后由它进一步把整个可燃的混合气体点燃。混合气体在燃烧室中的燃烧温度可达 $1500\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 。高温高压的燃气从喷管中喷出，产生反作用推力。



1—弹体；2—进气道；3—冲压发动机液体燃料；4—共用燃烧室；5—助推器药柱；6—助推器尾喷管；7—尾喷管。

图 1-10 整体式冲压发动机

冲压发动机点火多使用烟火点火器。它的工作过程是：先由指令信号使点火器的发火系统启动工作，发火系统再点燃主烟火药，产生足以保证点燃预燃室所需的高温产物。高温产物通过热传导、对流和辐射，将热量传给预燃室的可燃气，使可燃气体达到着火点，启动预燃室。预燃室是为使液体燃料冲压发动机可靠点火和稳定燃烧而在燃烧室中设置的小燃烧室，点火器点燃预燃室，形成先锋火炬，再点燃整个燃烧室。

1.3.2 起爆作用

在导弹武器系统中，战斗部系统是导弹武器的重要组成部分，是直接完成战斗使命的执行者，是导弹的有效载荷。战斗部的爆炸通用由引信控制，引信又称为战斗部的大脑，而引信的起爆控制作用则是由其爆炸序列完成的，这是一类具有起爆作用的火工品。

引信是一种能够在预定时间、地点，按预定方式使弹药起爆的装置。一般来讲引爆方式有三种：一种是战斗部碰击目标瞬时引爆，如打击具有装甲目标的聚能破甲战斗部即采用此种引信。另一种是战斗部碰击目标后经过一段时间后延期引爆，如破坏地下的建筑物和军事工事目标的爆破战斗部（因为让战斗部钻入地下一定深度后再引爆战斗部的装药，其破坏作用较在地面引爆效果更好）。第三种是战斗部在距目标适当高度或一定距离时引爆，如杀伤空中飞机、导弹等的杀伤战斗部。除上面三种情况之外，当导弹未能击中目标而脱靶之后，经过一定的时间，引信须能自动引爆战斗部，使导弹自毁。为了保证战斗部在运输、储存和勤务处理时安全，在引信内同样设置有安全保险机构。所以对引信来讲，它对战斗部要有引爆作用，对本身要有安全保险作用，对导弹脱靶时还要有自毁作用。

传爆系列是能量放大器。它的作用是把目标给予的起始能量转变为爆炸波或

火焰，并使这种起始能量逐级放大而引爆战斗部的装药。传爆系列由火工品（雷管或火帽）、主传爆药柱、辅助传爆药柱和扩爆药柱等组成。火工品和主传爆药柱一般都装设在引信内，成为引信的一个组成部分。

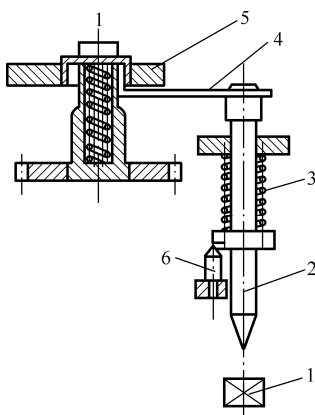
1. 触发引信

触发引信是靠接触目标来感知目标的，就是指导弹与目标的碰撞。由于碰撞，导弹受到目标的反作用力而减速，因而引起了引信运动状态的变化，从而使引信发火。

1) 发火机构

引信的发火机构由激励装置和传爆系列的第一个火工品元件组成，其作用是将由外界获得的或机构本身的某种能量转换成第一个火工元件的输出。发火机构是引信不可缺少的组成部分。

图 1-11 所示为弹簧针刺式发火机构。当弹簧针刺式发火机构工作时，压缩弹簧可以推动击针，也可推动火帽或雷管座完成发火作用。



1—火帽；2—击针；3—压缩弹簧；4—解脱钩；5—转针；6—支座。

图 1-11 弹簧针刺式发火机构

2) 传爆系列

较小的起爆冲量不足以完全可靠地引爆战斗部，因而就设置了冲量放大装置，形成较大的爆轰输出，完成起爆战斗部的目的，这个冲量转换放大装置即引信中的传爆系列。

如图 1-12 所示，火药延期引信和药盘时间引信传爆系列中第一个火工元件为火帽，而瞬发引信传爆系列中第一个火工元件为雷管。

3) 保险机构

保险机构是保证引信的被保险零件或机构在勤务处理、发射及导弹飞行时的安全，并能在适当时机解除保险使引信处于待爆状态的一种机构。它的职能是保险和解除保险。

保险机构必须要完成两项要求：一是平时必须要可靠地固定被保险零件，保证安全；二是解除保险可靠，不管在任何情况下都能可靠地解除对被保险零件的保险，使引信处于待爆状态。

图 1-13 所示为一种滑块式隔离机构。雷管装在一滑块上，平时滑块压缩弹簧，由制动杆制动，使雷管、火帽和导爆药不在一直线上，引信处于保险状态。当解除保险时，制动杆上升，解除对滑块的限制，滑块在弹簧作用下运动，使火帽、雷管、导爆药三者对正，引信处于待爆状态。此时火帽工作，则可点爆雷管，雷管引爆导爆药使整个引引起爆。

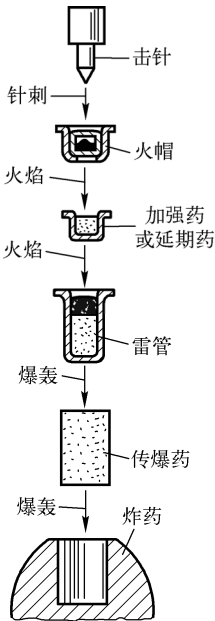


图 1-12 传爆系列原理图

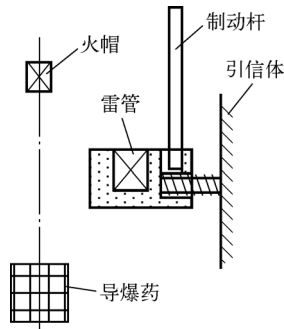


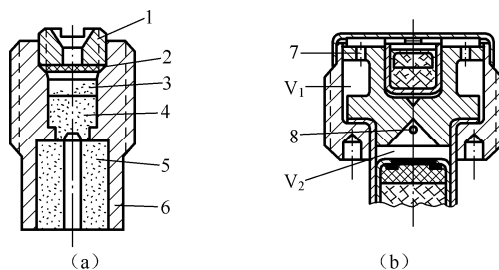
图 1-13 滑块式隔离机构

4) 延时机构

引信中常用的延时机构有火药延时机构和小孔气动延时机构等。

火药延时机构利用延期药柱的平行层燃烧来延迟火帽火焰向雷管传递的时间，它实际上是一个火药延期管，如图 1-14 (a) 所示。它的装药由引燃药柱、主延期药柱和接力药柱组成。主延期药柱是控制延长时间的基基本装药，通常延期时间不低于 0.001s。

小孔气动延时机构是根据气体动力学原理设计的。图 1-14 (b) 所示为一种形式。这种延时机构的工作过程是，火帽的火药气体在火帽所在的空室膨胀后，穿过两个小孔 7 进入第一空室 V_1 ，气体在第一空室 V_1 中膨胀后，经斜孔 8 传到第二个空室 V_2 ，当 V_2 室聚有足够热量和压力时，雷管即被引爆。



1—调节螺栓；2—纸垫；3—引燃药柱；4—主延期药柱；5—接力药柱；6—壳体；7—小孔（两个）；8—斜孔；V₁—第一空室；V₂—第二空室。

图 1-14 延时机构

5) 自炸机构

自炸机构是当导弹没有命中目标时，使导弹战斗部在弹道上某段自动爆炸的一种装置。其目的是使战斗部免落在己方地面伤害己方人员及地面建筑，另外也有利于武器的保密。常用的自炸机构有火药自炸机构和钟表自炸机构。

2. 非触发引信

非触发引信主要用在攻击空中目标的战斗部上和用于杀伤地面有生力量的杀伤爆破战斗部上。配用非触发引信的导弹，导弹发射后自己能够觉察到目标，并能选择最有利的炸点，在最佳位置使战斗部起爆，以充分发挥战斗部的威力。

非触发引信之所以能引爆战斗部，是因为该引信具有非触发装置，它能够使导弹（或战斗部）与目标接近时，自动察觉目标，并选择最有利的炸点，起爆战斗部。为了保证非触发装置和电点火管或电雷管正常工作，必须有电源，以供给所需之能量。图 1-15 所示为非触发引信原理图。

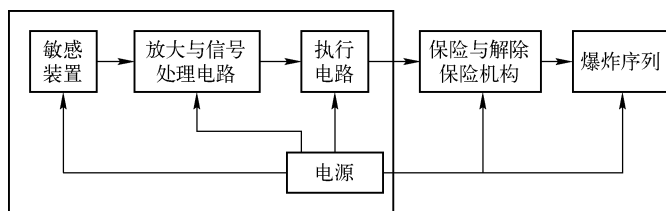


图 1-15 非触发引信原理图

以某无线电引信为例，其原理图如图 1-16 所示。

当勤务处理时，电池激活机构呈保险状态，电解液与极片分开，电源不工作。电雷管被扭簧短路，电子组件与电源未接通。保险机构的转盘被下推杆和离心销锁在隔离位置，即雷管与导爆药不对正，处于保险状态。这时如遇到意外情况引信不会作用。

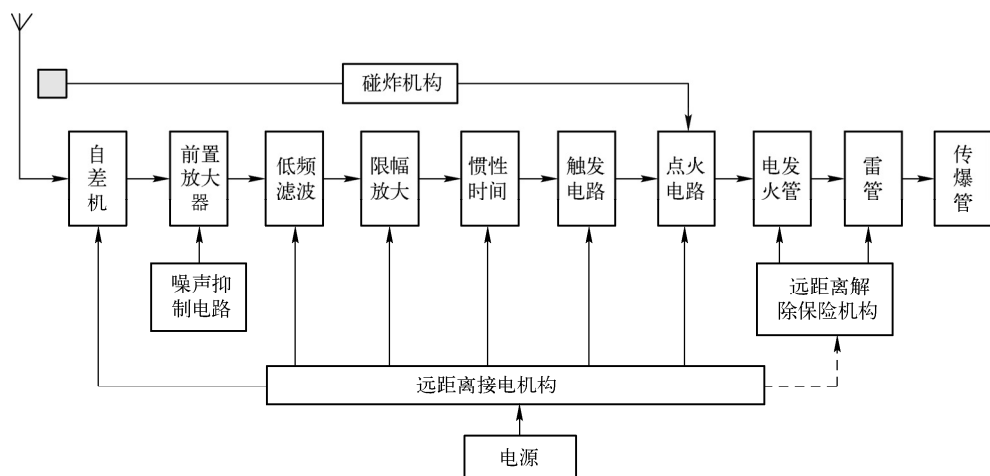


图 1-16 无线电引信工作原理图

发射后，在主动段飞行时，当离心力增大到足够大时，引信的电池激活机构在离心力的作用下，离心销克服保险弹簧的抗力，释放击针，击针在储能簧的推动下，戳击火帽发火，火药气体推动击瓶杆打碎电解液瓶，电解液在离心力的作用下，经过滤罩进入极片间并发生化学反应，电源开始供电。此时，延时电路开始工作。与此同时，保险机构中卡住转盘的离心保险销在离心力作用下飞开。

在弹道上飞行时，从电池激活后经过 2.4~2.5s 的时间，此时火箭弹飞离炮口约 1000m，延时电路使爆发驱动器发火，在火药气体作用下，扭簧将电源与电子电路接通，电子组件开始工作。与此同时，在离心力作用下保险也被解除，雷管和导爆药对正，整个引信处于待发状态。

在接近地面时，由于近感装置的作用，随着弹目的接近，多普勒信号越来越强。当弹目之间距离达到某一定值时，信号处理电路输出启动信号，点火电路工作，引爆电雷管，进而引爆弹丸。

当由于某种原因近感装置失效时，在弹丸撞击地面时，天线帽变形与碰炸杆接触，电碰炸机构作用，也能引爆弹丸。

1.3.3 做功作用

在导弹武器系统工作过程中，战斗状态的转换、弹翼或尾翼的展开、助推器的分离等许多环节，都需要专用的火工品来完成相关功能，这一类火工品均为做功火工元件。

做功火工品，又称动力源火工品。它是利用燃烧或爆炸产生的高温、高压气体做功力完成预定功能的火工品，其品种繁多，性能各异。

1. 火药驱动器

这是利用火药燃烧，产生气体推动活塞做功的火工品。它可以推拉，可以击

穿膜片，可以驱动闭锁、开关继电器，可以锁紧、松开某一特定机构，可以转动、切割。这些动作准确、可靠、安全。其突出的优点是体积小、质量轻。

2. 爆炸开关

爆炸开关又称爆炸继电器。它是利用爆炸产物做动力来完成启动、关闭机械或电动开关的火工品。

3. 燃气发生器

燃气发生器又称气体发生器，是利用火药或烟火剂的燃烧产生气体的火工品。其用途是在火箭与导弹上作为动力源，提供气动力，提供气源，给蓄液器内加压和激活热电池等。

4. 爆炸螺栓（螺母）

爆炸螺栓（螺母）是利用爆炸使螺栓（螺母）断裂的一种分离装置，在导弹的级间和头体分离中有着广泛的应用。

例如，某运载火箭的固体助推器挂载，使用了外燃料箱支承板，固体助推器挂载状态示例如图 1-17 所示。每个固体火箭助推器使用 3 个直径为 1.90cm 爆炸螺母固定在支承板上，其中每个螺母都能承受 4500kg 的载荷。爆炸螺母又称易碎螺母，是所有分离火工装置中最简单的一种，通常利用高压气体使螺母与螺栓分离。



图 1-17 固体助推器挂载状态示例

1.4 导弹火工品分类

导弹火工品仅为火工品应用的一个特定领域，其分类方式与通用火工品在本质上是一致的。由火工品的定义可以看出，火工品是“装有炸药的小型元件或装置，受一定的初始冲能作用即可燃烧或爆炸，以产生预期的功能”。火工品是以化学药剂（含能材料为主），如火药、炸药、氧化剂、还原剂、黏合剂和敏化剂为加工对象，经过特定的工序，加工成形的小型元件或装置。该元件或装置在结构、组成上有简单和复杂之分，在初始激发冲能上有输入能形式之分，在预期功

能输出形式上有燃烧、爆炸或做功之分。因此，火工品种类繁多、功能不一，可按输入/输出、结构和用途等多种方式进行分类，这些分类相互交错，各有其适用范围。

1. 按输入能源形式分类

火工品需要一定初始冲能输入才能发生作用。火工品的输入能源形式是多种多样的，主要有机械能、热能、电能、光能、爆轰能和化学能等，相应的火工品可分为机械能激发火工品、热能激发火工品、电能激发火工品、光能激发火工品、爆轰能激发火工品和化学能激发火工品六大类，见表 1-1。

(1) 机械能激发火工品主要有撞击火帽、撞击底火、摩擦火帽、针刺火帽等点火用火工品，以及针刺雷管、碰击雷管等起爆用火工品。

(2) 热能激发火工品主要有压缩空气火帽、热辐射发火帽、各种延期药盘、保险药柱、扩焰药和导火索等点火用火工品，以及火焰雷管等起爆用火工品。

(3) 电能激发火工品主要有灼热桥丝电引火头、电点火管、灼热桥电底火、导电药电底火、灼热桥丝式电点火具等点火用火工品，以及灼热桥丝式雷管、火花式雷管、金属膜式雷管、半导体涂膜雷管、爆炸桥丝雷管、半导体弹药雷管、飞片雷管等起爆用火工品等。

(4) 光能激发火工品以输入光能形式引起火工品爆发反应，如激光雷管等。

(5) 爆轰能激发火工品主要有导爆管、导爆索、导引传爆药、传爆药等。

(6) 化学能激发火工品以输入化学能形式引起火工品爆发反应，如浓硫酸点火雷管等。

表 1-1 火工品按输入能源形式分类

序号	类 别	实 例
1	机械能激发火工品	针刺（雷管、火帽等）、撞击（火帽、底火等）、摩擦（拉发雷管、拉火管）
2	热能激发火工品	火焰（导火索、火焰雷管）、绝热压缩（压空火帽等）
3	电能激发火工品	电雷管、底火及各种电点火具
4	光能激发火工品	激光雷管等
5	爆轰能激发火工品	导爆索、中继药柱、导爆药柱、传爆药柱、非电起爆系统传爆雷管
6	化学能激发火工品	酸点火管等

2. 按输出特性分类

火工品的主要作用是受一定的初始冲能后，输出燃烧或爆炸等预期的功能。因此，火工品按输出特性可分为点火火工品、起爆火工品、做功火工品和其他火工品四大类，见表 1-2。

表 1-2 火工品按输出特性分类

序号	类 别	实 例
1	点火火工品	火帽、底火、导火索、引火头、点火具、化学放热装置等
2	起爆火工品	雷管、导爆索、塑料导爆管、化学引爆装置、传爆管、导爆药柱等
3	做功火工品	切割装置、爆炸分离装置、驱动器、抛放弹、气体发生器等
4	其他火工品	延期管、时间药盘、曳光管

3. 按结构分类

由于作用需求不同，火工品在结构、组成上也存在较大差异。因此，可按结构、组成不同，将火工品分为简单火工品和复杂火工品两大类。

4. 按用途分类

火工品以其内部含能材料转化而成的多种能量形式，在军事装备上发挥重要的作用，有着广泛的军事用途。国家军用标准（GJB 347—87）《火工品分类和命名原则》中，对火工品分类、命名的原则和方法进行了详细的说明，该标准适用于兵器、航空、航天及导弹等所用火工品。该标准按输出特性和用途相结合的原则，将火工品具体细分为 14 类：火帽、点火头、点火管、底火、点火具、传火具、索类、延期件、雷管、传爆管、曳光管、作动器、压力药筒、爆炸螺栓。

1.5 导弹火工品特点

导弹武器系统从发射到毁伤整个作用过程均从火工品首发作用开始，所有的导弹装备都要配备一种或多种火工品。导弹火工品是导弹武器系统中最小的爆炸元件，是导弹必不可少的组成部分，也是导弹发射、状态转换、可靠爆炸的初始激发能源。导弹火工品的可靠性与安全性，直接影响着导弹飞行过程的成败及爆炸毁伤威力的发挥。火工品的基本特点是体积小，对外界冲能敏感，激发后反应速度快，并能输出相当的功率和威力，是导弹武器系统中最敏感的爆炸元件。因此，火工品既要在一定的外界冲能作用下可靠发火，输出足够的能量，又要确保勤务处理过程中的安全。导弹火工品的特点主要体现在以下几个方面。

1. 功能首发性

导弹发射和毁伤目标是导弹典型的工作过程。导弹发射任务由点火序列完成，典型组件包括点火管→引燃药→点火具（或传火管）→点火药，序列的第一个元件是火工品；导弹毁伤任务则由爆炸序列完成，典型的爆炸序列为火帽（电点火管）→火焰雷管→导爆管→传爆管和主装药，或针刺雷管（或电雷管）→导爆管→传爆管和主装药，序列的第一个元件也是火工品。因此，在导弹武器系统中的燃烧和爆轰，均以点火器（点火具等）的点火和起爆器（雷管等）的爆炸为始发能源。

2. 作用敏感性

火工品在导弹武器系统的点火序列和爆炸序列中处于首发地位，也是最敏感的元件。其中，所装填的火工药剂是导弹武器系统所用药剂中感度最高的，如在点火序列中药剂感度从高到低的顺序为点火药→延期药→发射药或推进剂；在爆炸序列中药剂的感度从高到低的顺序为起爆药→传爆药→主装药。

3. 作用一次性

由于火工品均装有含能材料，其工作过程也是化学内能释放，并向其他能量形式转化的过程，因此，火工品是一次性作用的元件，同一发产品其功能无法重现，这也是火工品与其他元件本质区别所在。在军用装备质量等级评定中，通常适用“新品、堪用品、待修品、废品”等几个级别，但火工品仅有“新品、堪用品、废品”等三个级别，由于其作用的一次性，因而也不具备可维修性能。

综上所述，火工品是起爆与点火的最敏感的始发能源，其功能首发性和作用敏感性决定了它在导弹武器系统中的地位和作用，通常在关键的时间和关键的地点发挥着关键的作用；同时，火工品的敏感性又对导弹武器的日常管理、维护及勤务处理构成潜在安全威胁。因此，火工品独有的特性，将直接影响导弹武器系统的安全性、可靠性。

1.6 导弹火工品战术技术要求

导弹及其配套火工品种类繁多，且使命任务、作用环境及工作过程各不相同，为了满足装备使用要求，适应广泛的应用范围，火工品必须满足以下基本战术技术要求。

1. 作用可靠性

按照导弹作用过程，要求火工品在规定的条件下、规定的时间内完成规定的功能。例如，导弹发射过程中助推器及主发动机的按时点火，飞行过程中导弹状态的及时转换，摧毁目标过程中的精确延时及瞬时起爆等，都对火工品的可靠性提出极高的要求。

2. 安全性

导弹的全寿命期包括生产、检验、运输、储存、维护、测试、装配、发射及飞行等多个环节和过程。由于导弹火工品均装有感度较高的含能材料，其特有的刺激敏感性，使其在各个过程中都存在固有的安全性风险，如未能很好地加以控制，就有可能转化为安全隐患，并引发爆炸事故。因而要求火工品必须具备此条件：在规定的条件下和规定的时间内，不发生爆炸或作用的性能，即具有良好的安全性。

3. 合适的感度

火工品对外界输入能量响应的敏感程度称为火工品的感度。要求合适的感度

是为了保证使用安全和作用可靠。安全和感度有时会发生矛盾，火工品感度过高，在外界刺激作用下能快速动作，保证良好的可靠性，而应有的安全性却难以保证，在制造、运输、储存及勤务处理过程中必然存在安全隐患；感度过低，火工品起爆或发生危险的可能性下降，安全性固然可以保证，却难以保证火工品在导弹武器系统中的可靠作用。因此，应辩证地解决好这一矛盾，使火工品具备合适的感度，感度太高或太低都是不可取的。

4. 适当的威力

炸药的做功能力又称为炸药的威力。它指的是炸药爆炸时对周围介质所产生的各种爆炸作用的总和，即炸药所做的总功。火工品的威力则是指其内部炸药作用时输出的能量。火工品的威力是根据使用要求提出的，威力的大小应以满足规定的功能为依据，过大或过小都不利于预定任务的完成。以引信传爆序列为例，雷管、导爆药、传爆药的威力设计，应以可靠传递爆轰能量，并最终引爆战斗部为依据。威力过大，会使引信的隔离机构失去作用，降低了引信的安全性；威力过小，则不能可靠引爆后续传爆组件，甚至产生半爆、断爆，无法完成规定的传爆任务。

5. 环境适应性

火工品在全寿命期中会遇到各种各样的环境条件，如温度、湿度、盐雾、霉菌等自然环境，振动、冲击、过载等力学环境，静电、射频、杂散电流等电磁环境。各种环境应力的作用，会使火工品的物理特性、化学特性、爆炸特性发生或快、或慢、或渐进、或显著的变化。所有这些性能的变化，将直接影响火工品战术、技术性能的发挥，并最终影响导弹武器系统的作战效能。因此，良好的环境适应性是火工品必须具备的基本性能。

6. 尺寸小型化

在导弹武器系统中，仅导弹战斗部是有效载荷，其他各子系统和组件均为非有效载荷。火工品是功能相对独立的元器件，是导弹武器系统的配套组件，在完成规定功能的前提下，使其尺寸小型化，可有效地节省导弹宝贵的能源、空间和质量资源，增加战斗部有效载荷，提高导弹毁伤效能，增加燃料和控制单元，整体提升导弹作战性能。火工品尺寸小型化的设计，也符合导弹系统小型化的发展趋势。

7. 良好的安定性

火工品安定性指的是产品在一定的条件下长期存放时，不发生质变和失效的性能。火工品是装有炸药的小型元件或装置，火工品的安定性既取决于火工品药剂的安全性，也与火工品结构设计及环境条件有直接的关系。其中，火工药剂的安定性是内因，起着决定作用；结构及环境条件则是外因，通过对药剂的作用，间接影响着火工品的安定性。导弹使用寿命通常在 10 年以上，对导弹火工品的安定性则要求更高，一般要求储存 15 年以上不变质，因此，导弹火工品必须具备良好的安定性。

本章小结

《火工品术语》(WJ 1624—1994)对火工品的定义是这样的:“装有炸药的小型元件或装置受一定的初始冲能作用即可燃烧或爆炸,以产生预期的功能。”本章着重介绍了火工品的基本概念、导弹火工品的用途、分类,总结了导弹火工品的主要特点,并对导弹火工品基本战术技术要求进行了阐述。

思考题

1. 导弹火工品主要用途有哪些?
2. 导弹火工品是如何分类的?
3. 试归纳导弹火工品战术技术要求。

第 2 章 火工品药剂

火工品是装有炸药的小型元件或装置，火工品作为导弹武器系统的特殊能源，其能量来自内部所装火工药剂在爆炸变化时所释放的能量。火工药剂的品种很多，根据其物理性质、化学性质和爆炸性质的不同，可以有不同的分类方法，但人们最关心的是按用途来分类。按用途的不同，可以将火工品分为起爆药、猛炸药、火药、点火药、针刺药、击发药、延期药等。本章着重介绍较为常用的起爆药、猛炸药、点火药和延期药。

2.1 起爆药

起爆药是火工药剂中最敏感的一种，在简单的起始冲量（火焰、撞击、针刺，摩擦、电热和电火花等）作用下，少量药剂就能发生爆炸变化。起爆药在很短的时间内爆轰速度可增至最大（爆轰成长期短），但是它的威力较小，在许多情况下不能单独使用，只是用来作为火帽、雷管装药的一个组分，以引爆猛炸药或点燃火药及其他药剂。

常用的起爆药有雷汞（ $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ ）、叠氮化铅（ $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ）、三硝基间苯二酚铅（ $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}$ ）、四氮烯（ $\text{C}_2\text{H}_8\text{ON}_{10}$ ）（又称特屈拉辛）、二硝基重氮酚（ $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_2\text{N}_2\text{O}$ ），以及以这些药为主所组成的共沉淀药剂、硝酸胥镍和 GTG 等。其中，雷汞已被淘汰，三硝基间苯二酚铅的火焰感度最好，四氮烯的摩擦感度较高，但是这两种起爆药的起爆力不大，不能单独使用。

2.1.1 起爆药特性

起爆药是炸药的一个类别。它本身具有不同于猛炸药的一些特性。这些特性主要表现在以下几方面：起爆药爆炸变化具有较快的加速度，爆燃能迅速转爆轰；对于简单的、较小的起爆初始能量较为敏感；具有较高的起爆能力；大多数起爆药属于生成热为负值的吸热化合物。这四方面的特殊性构成了起爆药区别于猛炸药的特殊本质。

1. 爆燃迅速转爆轰

起爆药的爆炸变化过程可以分成两个相互联系又相互区别的过程，即燃烧和爆炸过程。在一定条件下，爆炸变化在起爆药中的扩展过程可以转变为稳定

爆轰。因此，起爆药在受某种初始冲能引爆的过程，可以用爆炸变化速度来表示。爆炸变化速度的增长也称为爆炸变化的加速度。爆炸变化的速度，可以用单位质量的炸药所经历的反应时间表示，或以爆炸过程在单位时间内沿炸药传播的距离来表示。爆炸变化速度的增长即爆炸变化的加速度。起爆药被一定的初始冲能引起爆炸变化，由开始燃烧转变为稳定爆轰的过程所需时间比猛炸药短，即起爆药比猛炸药有较大的爆炸变化加速度。起爆药的爆炸变化加速度与猛炸药爆炸变化加速度关系如图 2-1 所示，图中 τ 为各类炸药达到稳定爆轰的时间。

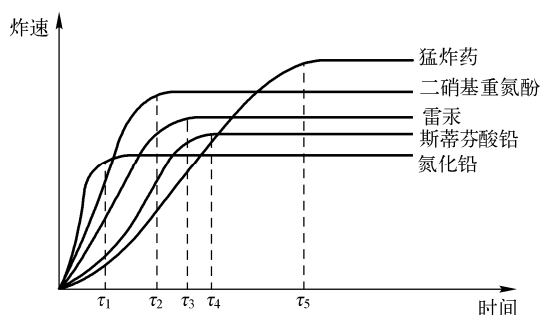


图 2-1 起爆药与猛炸药爆炸变化速度增长曲线

由图 2-1 可以看出，大多数起爆药的燃烧阶段是极短的，通常初始点火时，燃烧即近于爆燃，并迅速转成爆轰。起爆药具备这一特性的主要原因，一般认为起爆药本身对外界作用感度大，所需的起爆能量小，而且由于它们的密度较大，爆炸后在单位体积和单位时间内放出的能量多，因而具备更易于使爆燃迅速转为爆轰的条件。

2. 起爆药的敏感性

起爆药对外界作用比较敏感是它的一个重要特性。因此可以用较小的、简单的初始冲能引起爆炸，如撞击、摩擦、针刺、火焰或电能等都可以引起爆炸。引爆所需初始能量越小，则该起爆药的感度越大。例如，碘化氮这种起爆药用羽毛轻轻触动就能引起爆炸。正是由于起爆药的这一特性，决定了它在生产、运输、储存、使用中必须采取与其他炸药不同的特殊安全对策，如生产批量小，要求隔离操作、采取严格的防电磁与防机械冲击措施等。

不同的起爆药对外界作用的敏感程度（感度）有较大差别，对各种不同形式的初始冲能也有一定的选择性。外界初始冲能作用的类型很多，除机械（如撞击、摩擦、针刺等）、热（如加热、火焰）、电（如电热桥丝、放电火花等）形式外，激光、辐射、射频、静电等也能激发起爆药的爆炸变化。根据外界初始冲能作用类型的不同，起爆药相应具有各种不同的感度，如撞击感度、针刺感度、摩擦感度、火焰感度、热感度、热丝感度、静电感度、激光感度等。不

同的起爆药对不同形式的初始冲能具有一定的选择性。例如，叠氮化铅对机械作用比三硝基间苯二酚铅敏感，而三硝基间苯二酚铅对热作用却比叠氮化铅敏感。正是由于这一特性，在使用过程中，需要根据火工品的战术技术要求，选择不同的起爆药。

起爆药的感度既受自身化学结构特性的影响，又受物理状态和约束条件等外界因素影响。起爆药的结构和性质是决定起爆药敏感程度的根本因素。

1) 起爆药分子结构与感度的关系

(1) 键能对感度的影响。起爆药被外界初始冲能引发爆炸的本质是原子间键的断裂。起爆药发生爆炸变化首先必须破坏分子中原子间的化学键，若键能越小，破坏它就越容易，所以感度就越大；反之则感度越小。分子中所含基团的稳定性对起爆药感度有着决定性的影响。含有 N_3^- 基团和 ONC^- 基团的起爆药都比较敏感，这是因为 N_3^- 基团和 ONC^- 基团的键能较小，化学活泼性较大。

(2) 分子结构与成分对感度的影响。起爆药的感度首先取决于键能大小，而键能的大小又由起爆药分子结构和成分而定。单体起爆药分子中都含有各种不稳定的原子团或基团。起爆药分子中所含不稳定原子基团的性质、数目和在分子中的连接方式，都直接影响着起爆药的感度。一般来说，含有的不稳定原子团的稳定性越小，数目越大，则感度越高。

(3) 活化能对感度的影响。感度是结构不稳定性的一种标志，或是起爆药分子结构活性的外在表现。炸药的活化能实际上是炸药爆炸的一个能栅。这个能栅越高，炸药越不易被激发，感度就越低；反之，能栅越低，分子活性越高，越容易受外界作用激发，因而感度越高。起爆药分子结构的活性取决于分子中所含有的活性基团，如 $-\text{C}\equiv\text{C}-$ （乙炔基团）、 $\text{N}-\text{N}$ 结合（重氮、叠氮、不饱和和四氮或四唑等基团）、 $-\text{O}-\text{N}\equiv\text{C}$ （雷酸基团）等都是活性基团，而 $-\text{OH}$ 、 $\text{C}=\text{O}$ 等则是负电性基团，在起爆药分子结构中负电性基团能加强活性基团的活性，使感度增高。而分子中的正电性基团则属于非活性基团，它们使起爆药活性降低。一般情况下，当起爆药分子中含有相同的活性基团时，重金属离子的活性大于碱金属离子，故其感度也比较高。例如，重金属（ Pb 、 Hg 、 Cd 等）的叠氮化物较碱金属（ Na 、 K 等）叠氮化物或不含重金属盐的起爆药（如 DDNP 等）要敏感得多。应该指出，活化能受外界条件影响很大，所以不是所有情况都严格遵守这个规律的。

2) 影响起爆药感度的物理因素

影响起爆药感度的物理因素主要有起爆药的结晶形状、颗粒度、表面形状、装药密度及附加物等。

(1) 结晶形状对感度的影响。起爆药的结晶形状不同，其感度不同。如氮化铅有两种晶型： α 型叠氮化铅呈短柱形， β 型叠氮化铅呈针形，结构如图 2-2

所示。一般认为：晶体的晶格能大的，结构比较稳定，感度较低；晶格能小的结构比较不稳定，感度较高。 β 型氮化铅的晶格能低，所以针状结晶的机械感度比棱柱状的高。绝大多数起爆药都是在溶液中通过相变过程生成的晶体，因此，晶体的外形、粒度分布等标志晶体形态的形状因子，与结晶过程的热力学和动力学有关。在一定条件下，各种起爆药都有其固有的结晶习性。例如，斯蒂芬酸铅呈六角形棱柱状，二硝基重氮酚可以随结晶条件不同而呈针状、片状和球形聚晶等。常见的针状、片状晶体往往比柱状或球状晶体敏感。因此在起爆药的研制和生产过程中，人们常希望得到球形化晶体，以制得感度较低的起爆药。

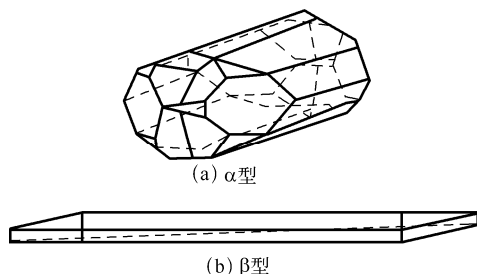


图 2-2 氮化铅结晶

(2) 结晶颗粒度对感度的影响。起爆药的粒度对感度也有很大影响，一般认为粒度小的感度高，这是因为细粒度的起爆药比表面积大，接收能量多，形成活化中心的数目多，容易引起爆炸反应。此外，从溶液中析出的起爆药晶体不可能是单一粒度，而是存在一定的粒度分布，可以肯定，均匀的粒度分布有利于降低起爆药的感度。因此，人们希望得到粒度分布均匀的晶体。

(3) 表面形状对感度的影响。起爆药的表面状况、晶形控制剂、添加剂的性质对感度有着极其重要的影响。多棱尖角且光滑的晶体表面，以及形态不规整的晶体外形，是造成起爆药感度增高的原因。

(4) 装药密度对起爆药感度的影响。一般来说装药密度增大时，会使某些起爆药的感度下降，这主要是因为装药密度增大，在受外界作用时，药粒之间的相对摩擦减小或使晶粒之间相对位移减小而致感度降低。因此，在一般情况下，起爆药不允许散装运输，必须把它制成火工品才可运输。装药密度增大时，其火焰感度也下降。这是因为，表面被压得密实，空隙减小，高温的燃烧产物不能深入至内部，所以不易点燃。

(5) 起爆药中的附加物或杂质对感度的影响。一般认为，所有惰性杂质都有降低起爆药感度的作用。对热作用的感度，惰性杂质的存在表现是明显的。因为惰性杂质吸收一部分热能，减小了起爆药得到的热能，要使起爆药起爆就必须增

加热能。至于机械感度会出现两种情况，某些杂质可以降低感度，而另外一些附加物或杂质则会增大起爆药的感度。使起爆药感度增高的物质称为敏感剂，使起爆药降低感度的物质称为钝感剂。在起爆药中掺加某些物质改变起爆药的感度是最有实际意义的。敏感剂通常是一些硬度较高、熔点较高、带有尖锐棱角的物质，如石英砂、细玻璃粉、各种金属颗粒等固体物质；钝感剂通常是一些熔点低、导热性大、发火点高的油脂类物质，如石蜡、沥青、石墨、糊精等高分子化合物等。

由于起爆药通常都具有较高的感度，因此，适当控制和降低其热感度、机械感度和静电感度等，也即起爆药的钝感化，是一项非常重要的工作内容。起爆药的钝感化有两种主要方法：一是为了改善起爆药晶体的结晶习性，控制晶体外形和粒度均匀分布，在起爆药制备过程中，常加入晶形控制剂和某些添加剂，消除尖棱部位，使其成为晶形规整、表面光滑、晶粒均匀的球形化晶体，降低起爆药的感度；二是用导热率小的钝感剂包覆起爆药晶粒，制成具有一定厚度钝感包覆层的球形晶体，钝感包覆层不仅具有吸热填充的作用，而且具有“隔热层”的作用，可阻止热量在晶粒间传播，还有利于缓解药剂颗粒间的摩擦，降低热点生成的可能性，从而控制和改善起爆药的感度。

3. 起爆能力

起爆药的起爆能力是指起爆药爆轰后能引起猛炸药达到稳定爆轰的能力。起爆药的起爆能力越强，炸药达到稳定爆轰所需爆速增长期越短，消耗在爆速增长期的药量越少，因而可以更好地发挥炸药的爆炸效能，同时，起爆能力大的起爆药可以制成体积较小的火工品。反之，如果起爆药的起爆能力较弱，爆炸后不足以使猛炸药达到稳定爆轰，导致炸药装药爆炸不完全，甚至完全不爆，起爆药就不能发挥应有的作用。

影响起爆药的起爆能力的主要因素如下。

(1) 起爆药的爆炸变化加速度越大，起爆能力越大。例如，叠氮化铅的爆炸变化加速度大于其他常用起爆药，所以它的起爆能力也大。

(2) 起爆药的猛度越大，起爆能力越大。这是因为起爆药之所以能够起爆猛炸药，主要是由于起爆药爆炸产生爆轰波向猛炸药冲击结果，爆轰波强弱与起爆药猛度有关。

(3) 在一定条件下，起爆药的结晶密度和表观密度大，起爆能力也大。另外，起爆药的爆速、爆温，起爆药所装填外壳的坚固性，起爆药的颗粒形态、大小等对起爆药的起爆能力也有一定影响。

起爆药的起爆能力通常用极限起爆药量来衡量。极限起爆药量是指能够起爆0.5~1g猛炸药，并使之达到稳定爆轰所需最小起爆药的药量。常用起爆药的极限起爆药量见表2-1。

表 2-1 常用起爆药的极限起爆药量（0.5g 猛炸药）

起 爆 药	极限起爆药量/g			
	特屈儿	梯恩梯	太安	RDX
雷汞	0.29	0.36	0.17	0.19
雷银	0.02	0.095	—	—
叠氮化汞	0.045	0.145	—	—
叠氮化银	0.02	0.07	0.005	0.025
叠氮化铅	0.025	0.09	0.01~0.02	0.05
二硝基重氮酚	0.075	0.163	0.08~0.1	0.16
三叠氮三聚氰	0.06	0.13		0.10
三硝基间苯二酚铅	1g 药量仍不能起爆猛炸药			
四氮烯	1g 药量仍不能起爆猛炸药			

由表 2-1 可以看出，雷汞的起爆力小于叠氮化铅，故目前叠氮化铅被广泛用来装填各种火工品，而雷汞只用在混合起爆药和部分火雷管中。

4. 生成热小

猛炸药的生成热大多数为正值，即生成时有热量放出，而起爆药的生成热则大多数是负值，即这些起爆药在由元素的原子组成其分子的过程中，从外界吸收了能量，为吸热化合物。形成分子时吸收的能量越多，则越不稳定，因此起爆药的感度较高。部分起爆药的生成热如表 2-2 所示。

表 2-2 部分起爆药的生成热

起 爆 药	分 子 式	生成热/（kcal/mol）
雷汞	$\text{Hg}(\text{ONC})_2$	-62.8
叠氮酸	HN_3	-67.0
叠氮化铅	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	-110.8
三氯化氮	NCl_3	-54.7
硫化氮	N_4S_4	-129.0
六次甲基三过氧化二胺	$\text{NCCH}_3\text{—O—O—}(\text{CO}_2)_3\text{N}$	86.7

从表 2-2 可以看出，起爆药的生成热有的为正值。与此对应，猛炸药的生加热也有为负值的，如特屈儿（-4.7kcal/mol）、奥克托金（-17.9kcal/mol）。因此，绝不能以生成热来严格地划分猛炸药与起爆药的界限，但可以说大多数的起爆药生成热是负值，在寻求新的起爆药时，可以多从这类物质着手。

负的生成热是造成感度大、爆轰成长期短的有利条件之一，因为在形成该物质时吸收能量越大，内能就越高，也就越不稳定，所以感度大。在激发后放出的

能量也越大，导致燃速增长率必然大，即爆轰成长期短。

5. 爆速低、爆热小

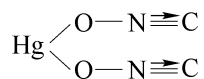
起爆药与猛炸药相比，一般来讲，起爆药的爆速低、爆热小、比热容也小，因此起爆药的威力、猛度也小。加之起爆药的感度大，所以，起爆药不适宜用作导弹武器的爆炸装药和爆破药柱。

2.1.2 几种常用起爆药

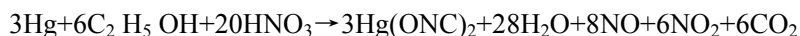
2.1.2.1 雷汞

雷汞是人们最早发现和广泛使用的起爆药之一。雷汞具有良好的火焰感和机械感度，在第一次世界大战以前，在火工品中雷汞是唯一的具有爆炸性的起爆药成分。后来随着武器弹药的发展，氮化铅、三硝基间苯二酚铅及特屈拉辛等大量生产，雷汞才逐渐被取代。

雷汞是雷酸（HONC）的汞盐，学名雷酸汞，分子式 $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ ，相对分子质量为 284.65，结构式：



雷汞是由汞与硝酸反应生成硝酸汞后，再与酒精作用而生成的。反应式为：



1. 物理性质

1) 外观

纯雷汞为白色，工业雷汞随制取方法的不同，有灰色、白色两种产品，即所谓的灰雷汞和白雷汞，它们都属于斜方晶系的细小结晶。火工品中使用的均为工业白雷汞。

2) 密度

雷汞的结晶密度为 $4.39 \sim 4.42 \text{g/cm}^3$ ，假密度为 $1.2 \sim 1.6 \text{g/cm}^3$ ，雷汞的纯度越低则密度越大。在雷管中压装密度通常为 2.5g/cm^3 。

装药密度随压药压力增大而增大，当压力为 250kg/cm^2 时，密度为 $2.4 \sim 2.6 \text{g/cm}^3$ ；当压力升到 1500kg/cm^2 时，密度升至 4.1g/cm^3 。雷汞的爆炸性质受压药压力的影响较大，在压力超过 500kg/cm^2 时，会出现“压死现象”。

3) 溶解度

雷汞在水中的溶解度很小，100g 水中的溶解度是：12℃时为 0.07g，100℃时为 0.77g。雷汞微溶于酒精，易溶于氨水或用氨水饱和的丙酮中，当 30~35℃时，30 份的氨水可溶解 1 份雷汞。浓氨水与酒精和水的混合液，是雷汞的良好溶剂，当这三种组成的体积比为 2：1：1 时，雷汞的溶解度最大。

4) 吸湿性

雷汞的吸湿性很小，在各种相对湿度下的吸湿性如表 2-3 所示。

表 2-3 雷汞的吸湿性

相对湿度/%	储存时间/天	吸收水分/%
50	60	0.02
80	80	0.02
100	80	0.16

5) 熔点

加热时即分解。

6) 挥发性

不挥发。

7) 比热容

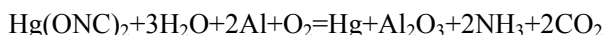
110℃为 0.119cal/g，125℃时为 0.120cal/g。

2. 化学性质及安定性

雷汞与碳酸不起作用。浓盐酸可使其分解，可用此法销毁雷汞。浓硝酸也能使雷汞分解，当雷汞遇到浓硫酸时将分解剧烈，并可引起爆炸。

弱碱与雷汞作用缓慢，而强碱可使雷汞分解，因此，也可利用苛性碱销毁少量雷汞。

雷汞与铝、镁等金属较易作用，生成结构疏松、无爆炸性的铝、镁氧化物，尤其在有水分存在时，作用更为剧烈，反应如下：

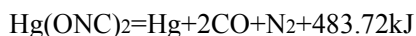


雷汞与镍不起作用，但因镍价格高，且硬度大不便于加工，一般采用铜壳或镀镍的铜壳作为盛装雷汞的管壳。

雷汞对热的安定性尚好，比氮化铅、斯蒂芬酸铅和二硝基重氮酚稍差，与四氮烯相近。在常温下是安定的，在 50℃加热 2h 后开始分解，75℃加热 48h 失重 0.81%，100℃加热 48h 以内，可使其爆炸。当温度为 172℃时，即使在真空条件下也能很快爆炸。

3. 爆炸性质

雷汞的理论分解式为：



雷汞具有一定的起爆力，但比氮化铅和二硝基重氮酚小。雷汞的起爆力随压药压力的升高稍有降低，但是，压药压力不能太小，必须能够保证爆轰波的正常传播。

雷汞对冲击、摩擦、火焰及电火花等都比较敏感。通常雷汞针刺感度随压药压力增加而增大。当压力为 700~750kg/cm² 时，针刺感度最合适。当压力超过

500kg/cm²时，火焰感度下降，出现“压死”现象。

雷汞的爆炸参数如下：

爆热：1542.9kJ/kg；

爆发点：175~180℃（5min），210℃（5s）；

爆速：5050m/s（密度 4.0g/cm³）；

爆压：8684kg/cm²（密度 1.0g/cm³）。

4. 毒性

雷汞有金属的甜味，有毒，其毒性与金属汞相似。雷汞粉尘能使鼻、喉、眼的黏膜痛痒，长时间连续接触湿雷汞，皮肤也会痛痒，甚至引起湿疹病。

5. 用途

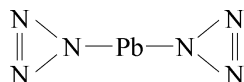
近百年来，雷汞一直是雷管的主装药和火帽击发药的重要组分，主要用途是与氯酸钾、硫化锑混合作为火帽的击发剂，且多用于引信火帽。但由于它属于一种有毒物质，其毒性与汞相似，加之热安定性和耐压性差，同时含雷汞的击发药易腐蚀炮膛和药筒，所以，在军事上已逐渐被叠氮化铅、斯蒂芬酸铅和特屈拉辛等起爆药代替。在工业雷管中，雷汞则被二硝基重氮酚取代。在我国雷汞已基本被淘汰。

2.1.2.2 氮化铅

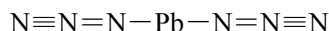
氮化铅是 1891 年由库尔齐乌斯将醋酸铝加入叠氮化铵溶液中制得的。1907 年在法国首先制成了能够使用于炸药工业中的氮化铅。由于氮化铅制造过程中存在一定的危险性，因此，在第一次世界大战前，军事工业中没有广泛应用，而在第一次世界大战期间，瑞士、俄国和美国才逐渐生产和使用。

叠氮化铅（简称氮化铅）的分子式为 $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ，它是叠氮酸的铅盐，相对分子质量为 291.26。结构式有两种，即环状结构和链状结构。

环状结构式为：



链状结构式为：



一般认为是链式结构。

氮化铅最突出的优点是爆轰成长速度快，即爆炸在极短的时间内，迅速转变为爆轰。因而在单位时间内放出的能量大，它的起爆能力就大。氮化铅不仅具有较高的起爆能力，而且还有良好的耐压性能。因此，它对提高火工品的起爆能力，对适应缩小雷管体积要求及起爆较钝感的猛炸药等，提供了有利的条件。同时它不易吸湿和不易分解，具有良好的安定性，因此便于长期储存，为现代武器的应用提供了足够的可靠性。氮化铅不溶于水，水分含量增加时其起爆力无显著降低，因此，适用于作为水下爆破的雷管装药。氮化铅与目前常用的其他几种起爆药相

比较，它是性能最优良的一种。氮化铅的缺点是火焰感和针刺感度低。在装填火焰雷管时，为了克服 $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 火焰感度低的缺点，将三硝基间苯二酚铅压装在氮化铅的表面上。

目前，氮化铅起爆药品种系列发展很快，特别是在提高氮化铅的纯度和选用控制剂方面，发展更快。例如，从粉末氮化铅、石蜡钝化氮化铅发展成糊精氮化铅、聚乙烯醇氮化铅、甲基纤维素氮化铅、导电氮化铅，以及含有氮化铅的各种包结化合物、复盐、络合物等。

1. 物理性质

1) 外观

氮化铅为粉状结晶物质，化学纯的为白色，工业品为微粉红色。由于结晶条件的不同，可以呈现四种晶形，在生产条件下，通常有两种晶形。

α 型：属斜方晶系，短柱状，是稳定晶型，感度较小。

β 型：属单斜晶系，长针状，干燥状态下是稳定晶型，但在晶体成长母液中是不安全的，感度较大。

2) 密度

α 型晶体的密度为 4.71g/cm^3 ， β 型晶体的密度为 4.93g/cm^3 。它们的假密度在 $1.2\sim 1.4\text{g/cm}^3$ 。大结晶氮化铅的压缩性比细结晶的好。过去由于大结晶产品中常含有针状的 β 型晶体，它在压药时能因摩擦及晶体折断而导致爆炸，现在由于对晶体控制有了提高，大结晶的产品已能生产和应用。

3) 溶解性

氮化铅在水中的溶解度很小，温度增高溶解度略有增高，在 100mL 水中， 18°C 时能溶解 0.023g， 70°C 时能溶解 0.090g。在沸水中的溶解度稍大些，但这时会有部分的氮化铅发生分解，而生成不溶于水的氢氧化铅，缓慢冷却时氮化铅即以 β 型结晶析出，并可能发生自爆。氮化铅不溶于乙醇、乙醚及氨水，可溶于盐的溶液（如醋酸铵、醋酸钠等），易溶于乙胺。

4) 吸湿性

氮化铅的吸湿性小，在相对湿度为 65% 时，饱和吸湿量为 0.2%；在相对湿度为 100% 的条件下，储存 40 天，吸收水分 1.6%~1.9%，室温下不挥发。

5) 挥发性

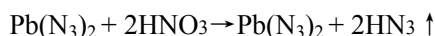
不挥发。

2. 化学性质

1) 与酸碱作用

氮化铅易溶于热醋酸中，而且在其中能逐渐地析出氮氢酸（叠氮酸），它是至今所知炸药中最猛烈的一种，而且有毒，其水溶液能使皮肤腐烂。

氮化铅易溶于稀硝酸中，并能分解放出叠氮酸，其反应如下：



因此可根据此性质，将氮化铅溶于稀硝酸中再加入亚硝酸钠以进行销毁。

浓硝酸能使氮化铅激烈分解而导致爆炸。浓硫酸可使湿的氮化铅爆炸。

在碱性介质中，氮化铅能够分解，并形成碱性氮化铅。这种分解进行得缓慢，因为它在氮化铅晶体表面上成为一种保护膜，阻止碱性溶液向氮化铅晶体内渗透，使反应难以继续进行，但在加热及搅拌的条件下，可以加速碱性溶液对氮化铅的分解作用。

2) 氮化铅与金属的作用

氮化铅在干燥的条件下，与金属不起作用。氮化铅不与铝、镍、锌、铅作用，所以装 $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 的管壳应该用这些金属制成，用氮化铅装填雷管时，只能压装在铝或锌的管壳中。

当有水分存在时，氮化铅与铜及其合金（黄铜、白铜）作用，在潮湿并有二氧化碳存在时，会由表面产生局部的分解生成叠氮酸，并与铜化合生成叠氮化铜或叠氮化亚铜，它们的机械感度虽不比氮化铅大，但对电场或电荷的感度却比氮化铅大得多（最低起爆能量仅为 $1\sim 10\mu\text{J}$ ）。

3) 氮化铅的热安定性

氮化铅对热作用是比较安定的。在 50°C 下存放 3~5 年，其性质无显著变化。在黑暗处 115°C 条件下加热 24h 也是如此。只在 170°C 以上加热时才发现有重量损失。例如， 175°C 下缓慢加热时，短时间内就有明显的重量损失。当温度高于 200°C 时，则分解加快，最后可变成不能爆炸的粉末。当温度为 $245\sim 250^\circ\text{C}$ 时，极缓慢地加热可使氮化铅完全分解而不爆炸。当温度高于 350°C 时，即使在真空状态下也能发生爆炸。

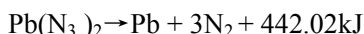
4) 光对氮化铅的作用

氮化铅受光线照射不长的时间，其表面即变成黄色。但表面这一层变化了的氮化铅能保护下面的氮化铅不致继续分解，因此，光照不会改变氮化铅的爆炸性能。但如果在光照时加以搅动或不断进行振动，可使它严重分解。紫外线能使氮化铅缓慢分解，当照射很强时，可引起氮化铅爆炸。

3. 爆炸性质

1) 爆炸分解反应式

氮化铅的爆炸分解反应为：



以下是主要爆炸性能参数。

爆热： $Q_v=1540\text{kJ/kg}$ 。

爆容： 308L/kg 。

爆温： 4330°C 。

爆发点： $320\sim 360^\circ\text{C}$ ，常用的数据是 5s 延滞爆发点为 327°C 。

爆速：与装药密度有关，密度分别为 3.51g/cm^3 及 4.05g/cm^3 时，爆速分别为

4745m/s 和 5276 m/s。

2) 机械感度和热感度

氮化铅的撞击感度上限为 24cm，下限为 10.5cm（400g 落锤），摩擦感度的爆炸百分数为 76%。针刺感度比较低，这是它的严重缺点，因而不能单独用作针刺雷管的装药。氮化铅的另一个缺点是火焰感度低，上限（百分之百发火的最大高度）不大于 8 cm。由于叠氮化铅热安定性优良，故常用作耐高温雷管的装药。叠氮化铅的针刺感度和火焰感度都比较低，用它单独装填针刺或火焰雷管不能保证可靠发火，因此，必须增装一层对针刺或火焰敏感的刺发剂或火焰敏感剂。

3) 起爆能力

在常用的几种单质起爆药中，氮化铅的起爆能力是最高的，氮化铅的起爆力比雷汞要大 5~10 倍。几种起爆药的起爆力比较见表 2-4。

表 2-4 几种起爆药的起爆力比较

起爆药 起爆药量/g	猛炸药		
	特 屈 儿	苦 味 酸	梯 恩 梯
氮化铅	0.025	0.025	0.09
雷汞	0.29	0.3	0.36
二硝基重氮酚	0.075	0.115	0.163
注：猛炸药为 1g。			

4. 毒性

氮化铅本身是一种有毒物质，其分解产生的氮氢酸毒性更大。氮氢酸为无色易挥发的有毒液体。气态的氮氢酸在空气中浓度很小时就能使人头晕；浓度大时甚至使人停止呼吸。氮氢酸的水溶液能使皮肤腐烂。

5. 用途

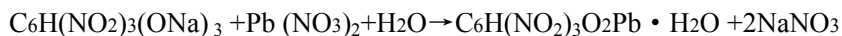
由于氮化铅有较大的起爆能力，冲击感度和摩擦感度都较低，适用于初速大、射程远的引信上。当起爆能力一定时，用氮化铅制得的雷管比用其他起爆药制得的尺寸小，安全性也好。因此，导弹引信雷管中氮化铅完全代替了雷汞。

氮化铅不能装填火帽，这是由于它实际上没有燃烧过程。氮化铅的针刺感度低，用它制造针刺雷管时，要加针刺药；氮化铅对火焰的感度低，用它制造火焰雷管时应加对火焰敏感的药剂（如三硝基间苯二酚铅）。

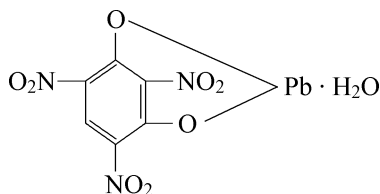
2.1.2.3 三硝基间苯二酚铅

1914 年，冯·赫兹首次采用硝酸铅溶液与斯蒂芬酸的钠盐或镁盐溶液反应制得了三硝基间苯二酚铅，它是一种单质弱起爆药，学名 2,4,6-三硝基间苯二酚铅，是 2,4,6-三硝基间苯二酚的铅盐，又称斯蒂芬酸铅，简写为 LTNR。一般情况下，

三硝基间苯二酚铅（正铅盐）含一分子结晶水，分子式为 $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，相对分子质量为 468.3。其反应如下：



三硝基间苯二酚铅的结构式为：



三硝基间苯二酚铅是一种爆炸性能较差的起爆药，由于它的爆炸变化加速度小、爆轰成长期较长、起爆能力较小，故不适宜单独用作雷管的装药。但它具有较高的火焰感度，常用于火焰雷管中，覆盖在叠氮化铅上面，以弥补叠氮化铅火焰感度的不足。在电发火的火工品中，常将三硝基间苯二酚铅作为电发火头的成分。三硝基间苯二酚铅与四氮烯的混合药剂，对针刺撞击作用敏感，常用于火帽中无锈蚀击发药中代替雷汞。在针刺火工品中，三硝基间苯二酚铅也是针刺药的重要组成成分。因此，三硝基间苯二酚铅是一种常用的起爆药。

1. 物理性质

1) 外观

三硝基间苯二酚铅是棕黄色苯环形棱柱状晶体。

2) 假密度

三硝基间苯二酚铅密度为 $3.085\text{g}/\text{cm}^3$ ，假密度为 $1.4\sim 1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，通常压至 $2.6\sim 2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。

3) 吸湿性

吸湿性很小，在温度为 25°C 、相对湿度为 90% 时，吸收水分 0.02%。

4) 溶解性

三硝基间苯二酚铅在水中溶解度很小， 17°C 时 100mL 中仅溶解 0.07g，微溶于酒精、乙醚等有机溶剂。在醋酸铵溶液中溶解较好，故可利用这一性质分析含有三硝基间二苯酚铅的击发药。

5) 挥发性

不挥发。

2. 化学性质

1) 与酸、碱的作用

三硝基间苯二酚铅与硫酸、硝酸、碱都能发生反应。三硝基间苯二酚铅与无机酸发生化学反应，因此可用无机酸销毁三硝基间苯二酚铅，同时回收三硝基间苯二酚。三硝基间苯二酚铅与碱反应，所以也可以用碱销毁三硝基间苯二酚铅，但是需要加热，否则易生成胶体物质。

2) 与金属作用

三硝基间苯二酚铅与金属不反应，所以可采用任何金属壳体装药。

3) 热安定性

加热高于 100℃ 时，失去结晶水，于 115~120℃ 下加热 220h，减量约 3.89%，由于含有 3.84% 的结晶水，所以实际分解极少，故热安定好。当加热到 200℃ 时开始有显著分解现象。把脱水的三硝基间苯二酚铅置于湿气中，它可以重新吸收水分，而脱水的三硝基间苯二酚铅丝毫不会改变其结晶形状、轮廓与透明度。

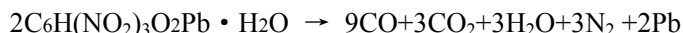
4) 光线照射

光辐射对三硝基间苯二酚铅有一定的作用，阳光照射下的三硝基间苯二酚铅颜色变暗而分解。

3. 爆炸性质

1) 爆炸反应式

三硝基间苯二酚铅的爆炸反应式为：



以下是主要爆炸性能参数。

爆热： $Q_V=1910\text{kJ/kg}$ 。

爆容：470L/kg。

爆温：2100℃。

爆发点：5s 延滞爆发点为 265℃，5min 延滞爆发点为 270~280℃。

爆速：随密度的变化而变化，密度为 1g/cm^3 时，爆速为 1603m/s；密度为 2.6g/cm^3 时，爆速为 4900m/s；当密度增加到 2.9g/cm^3 时，爆速为 5200m/s。

2) 撞击感度

上限为 36cm，下限为 11.5cm，撞击感度比雷汞及氯化铅低。

3) 摩擦感度

爆炸百分数为 70%，低于雷汞及氯化铅。

4) 火焰感度

上限（全发火的最大高度）为 54 cm，比其他任何炸药都高。

5) 静电积累及静电感度

三硝基间苯二酚铅的静电火花感度在几种常用起爆药中是最高的，容易产生静电积聚，造成静电放电而发生爆炸事故。若用最小静电火花能量 E_{\min} 表示静电火花感度，三硝基间苯二酚铅为 0.0009J，雷汞则为 0.025J，为了降低它的静电感度，目前采用沥青钝化等措施。

6) 起爆能力

三硝基间苯二酚铅的爆速虽然较大，但是它的爆炸变化加速度很小，燃烧转爆轰较难，所以引爆猛炸药所需的极限药量较大，即起爆能力小，因此不能单独装填雷管。例如，对粗松的太安，极限装药量为 1.43g/cm^2 ；对特屈儿极限装药量

为 5.2g/cm^2 ，不能起爆梯恩梯。

4. 毒性

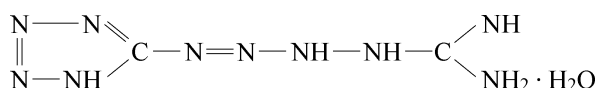
三硝基间苯二酚铅是一种有毒物质。

5. 用途

由于三硝基间苯二酚铅的火焰感度大，所以常用它作火焰敏感剂，用作火焰雷管的第一层装药；另外，还用作电点火头、无腐蚀性击发药和刺发药的成分。

2.1.2.4 特屈拉辛

特屈拉辛化学名称为 1-脒基-4-亚硝胺脒基四氮烯，简称四氮烯，是一种氮质量分数很高的单质起爆药，分子式为 $\text{C}_2\text{H}_8\text{ON}_{10}$ 。四氮烯是由硝酸氨基胍与亚硝酸发生重氮化反应制得的。相对分子质量 188.16，结构式为：



1. 物理性质

1) 外观

四氮烯是松散的白色细晶粉末，或稍带淡黄色的粉末状结晶，晶形呈楔形。

2) 密度

堆积密度为 $0.4 \sim 0.45\text{g/cm}^3$ ，流散性较差。当压力为 200MPa 时，其压药密度为 1.47g/cm^3 ，耐压性也较差。用硝酸重结晶后密度为 1.641g/cm^3 。

3) 吸湿性

吸湿性很小，在温度为 30°C 、相对湿度为 90% 的条件下，长时间保存，吸湿增量为 0.77%。

4) 溶解性

微溶于水，当温度为 22°C 时，在 100cm^3 水中的溶解度为 0.02g。也不溶于大多数的有机溶剂，如乙醇、戊醇、乙醚、丙酮、苯、甲苯、四氯化碳、硝基苯、氯苯、溴苯和二氯乙烷等。特屈拉辛是弱碱性物质，能够溶于稀酸，加水后又能重新析出，碱能使特屈拉辛分解。

5) 挥发性

含有 4% 的外挥发成分，加热至 50°C 时，挥发分即可失去，而四氮烯本身并不发生质的变化。

2. 化学性质

1) 与酸、碱的反应

热稀酸、冷浓酸可使四氮烯分解，随着酸浓度及作用时间的不同，生成多种水解产物。例如，热的稀酸可使四氮烯分解成氨基胍、氰、氮气和 水；热的稀碱液也可使四氮烯分解成胍、水和叠氮四唑，生成的胍在碱性介质中又可继续分解为氰胺和氨。

2) 与金属作用

与金属不起反应，因此可装填于各种金属的管壳中。

3) 对热的安定性

四氮烯的安定性较差。当温度低于 75℃ 时，四氮烯是安定的。加热超过 75℃ 则引起分解。75℃ 时经 10 昼夜后失重 8%，色变黄；在 85℃ 经 20 昼夜后失重 20%，色变褐；若加热时间更长，则产品失去爆炸性能。加热到 100℃，产品明显分解。

4) 与水的作用

四氮烯在常温下安定，在 50℃ 以下加热无变化，60℃ 下加热安定性仍然良好。在 75℃ 时，经过 7 昼夜，损失量约为 8%，且变为黄色。加热至 85℃ 以上时，色变褐，在 20 昼夜内其损失量约为 20%。在这一温度，若加热更长时间，则产品失去爆炸性能。加热至 100℃，产品立即明显分解。

3. 爆炸性质

1) 主要爆炸性能参数

爆热： $Q_v=3200\text{ kJ/kg}$ 。

爆容：400~450L/kg。

爆温：4950℃。

爆发点：5 min 延滞爆发点为 135~140℃，5s 延滞爆发点为 160℃。

2) 机械感度

冲击感度（400g 落锤）：爆炸上限 6.0cm，下限 3.0cm，稍高于雷汞；摩擦感度：爆炸百分数为 70%，略低于雷汞，与结晶斯蒂芬酸铅相近。

针刺感度：用标准击针和质量为 200g 的落锤试验，得到的针刺感度数据为上限（100%爆炸的最小高度）15cm，下限（100%不爆炸的最大高度）10cm，在几种常用起爆药中，四氮烯对针刺作用最为敏感。

3) 火焰感度

全发火最大高度即火焰感度上限为 15cm，略低于雷汞。

4) 静电感度

最小发火能量为 0.010J。

5) 起爆能力

四氮烯的猛度和起爆能力均比较低，用 1g 药剂尚不能起爆特屈儿，其原因可能是分解反应复杂，以致燃烧较难转变成爆轰。另外，由于它的密度小、爆轰波强度不大等原因，造成了起爆能力不足。由于四氮烯猛度小，起爆能力低，热安定差，不能单独用作起爆药。

4. 毒性

四氮烯是一种有毒物质。

5. 用途

由于特屈拉辛对针刺很敏感，所以它主要作击发剂及刺发剂的成分，用于提

高击发药的针刺感和点火性能，与其他药剂一起取长补短，尤其在导弹引信针刺雷管、火帽中使用更为普遍，它保证了雷管、火帽对针刺作用的确性。

下面以四氮烯和三硝基间苯二酚铅等混合组成的无腐蚀性击发剂为例：四氮烯易成粉末，冲击感度大，点火能力不足，分解成碱性气体；三硝基间苯二酚铅易结块，撞击感度小，点火能力强，分解生成酸性气体。由于它们可以互相弥补不足，所得混合物不粘器壁，便于压药，易于击发，点火能力适中，分解成的气体无腐蚀性。所以，目前火帽多采用这种击发剂以替代由雷汞、氯酸钾和硫化锑组成的击发药。

再如，氮化铅加入四氮烯，可增强氮化铅的针刺感和点火性能，如氮化铅点火温度约为 330°C ，加入 $10\%\sim 15\%$ 的四氮烯，其发火温度可降至 $145\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。因而，四氮烯又常用作击发药的敏感剂。

2.1.2.5 混合起爆药

随着导弹武器系统的发展，对起爆药提出了许多新的要求，现有的单体起爆药还不能完全满足这些要求。例如，要求高的起爆力，以便制得微型火工品；要求抗高热、抗静电、抗射频，以保证研究生产和维护使用的安全；要求各种特殊的感度，如良好的针刺感度、冲击感度、火焰感度等。要适应这多种多样的要求，目前的几种常用单体药是不能胜任的。例如，雷汞的火焰感度好，但机械感度大，起爆力较小；氮化铅的起爆力大，机械感度小，火焰和针刺感度也不好；斯蒂芬酸铅火焰感度好，四氮烯的针刺感度较好，但是又不能单独地用作起爆药。总之，单独使用缺点较多，必须混合起来应用，以达取长补短的效果。

1. 击发药

击发药大多用于各种导弹引信火帽中，由于它是受针刺或撞击引起发火的药剂，故称击发药。它是火帽的能源，决定了火帽的点火能力和感度性能。它在引信中受击针刺激而发火。输出火焰点燃延期药、时间药剂、扩焰药、传火药与火焰雷管。

在导弹武器的传火序列及传爆序列中，火帽都发挥着非常重要的作用，要求火帽具有足够的点火能力、适合的感度，并保证导弹引信在勤务处理过程中的安全。因此，火帽在击发药成分组合的选择上，必须确保有足够的点火能力、适合的感度、良好的化学安定性，从而保证使用安全性、准确性和可靠性。击发药的点火能力，是指击发药爆发反应后的火焰作用能力，通常是指火焰的成分（气固液相比例）、火焰温度、火焰强度及火焰持续时间等因素的综合表现。火焰成分是指击发药爆发时形成的可燃气体和固体生成物（炽热固体颗粒）。含有固体炽热微粒的火焰要比不含固体颗粒的火焰具有较大的点燃能力。因为炽热的固体颗粒具有较大的密度和较大的热容量，火焰成分中含有炽热固体颗粒越多，火焰的点火能力就越大。击发药燃烧反应温度越高，其点火能力越大。在零氧平衡时，火焰

温度最高，点火能力强。火焰强度是指击发药燃烧反应时，生成的气体对被点燃对象（如雷管）形成的压力的大小及火焰散布面积或长度的大小。一般是火焰强度越大，其点火能力越强。火焰持续时间的长短则与击发药的药量多少有关，药量多则持续时间长。

击发药通常是采用起爆药、可燃剂和氧化剂组成的机械混合物。起爆药主要用来保证击发药的适当感度和猛度，氧化剂和可燃剂主要用来保证击发药的点火能力。

击发药中常用的起爆药有雷汞、氮化铅、四氮烯、二硝基间苯二酚铅等。但是，在击发药中单装这些起爆药不能保证足够的点火能力，因为起爆药的爆速高、作用时间短、点火能力不足，并且因猛度大而易破坏需要点燃的传火对象。

氧化剂的种类很多，但适合作为击发药的氧化剂并不多。对氧化剂的要求是：含氧量要丰富、吸湿性要小，分解温度不能太高且容易分解。能够满足上述要求的氧化剂有氯酸钾、硝酸钡、硝酸钾、四氧化三铅等。氯酸钾是使用较早的也是性能较好的氧化剂，但分解后产生的氯化钾会产生严重的腐蚀。硝酸钡含氧量不太丰富，分解温度也比较高，一般不宜单独使用，常与氯酸钾混合使用，以调整反应过程中的燃速，增加击发药的火焰持续时间。

对可燃剂要求是：需氧量小，吸湿性小，安定性好，燃烧放热量大，具有足够的热效应。适用于击发药的可燃剂主要是无机可燃剂且大多为金属化合物。因为单质金属如 Mg、Al、Sb、Si 等在其燃烧时，虽能放出大量的热量和含有一定的固体粒子或残渣，但没有气体产物，不能得到足够的点火能力。非金属物质如 S、C、P 及其他有机物虽能产生大量气体，但在反应中缺乏大量的高温固体粒子，不能满足点火能力方面的要求。可燃剂使用较多的是锑的硫化物，如 Sb_2S_3 。在击发药中一般常用三硫化二锑作为可燃剂，因为它具有一定的硬度，燃烧时可以产生大量气体和高温固体粒子，故常用于改善击发药的感度和点火能力。例如，由雷汞、氯酸钾、硫化锑等成分组成的击发药，其感度大小主要取决于雷汞质量分数的大小，雷汞质量分数大，击发药的感度就大，它在其中起到起爆剂的作用，不仅感度高，而且具有在一定质量分数下只燃烧不爆炸的性能。氧化剂氯酸钾、可燃剂硫化锑，在药剂中是以其发火后产生的高温气体和燃烧产物（固体炽热残渣）作为火焰强度的主体，以保证击发药的点火能力，同时由于硫化锑的感度大，它的质量分数和粒度的变化可调整击发药的感度。

含雷汞击发药虽有一定的优点，但因雷汞具有毒性大、成本高、腐蚀性大等缺点，故含雷汞击发药已逐渐被氮化铅、四氮烯、三硝基间苯二酚铅等组成的无雷汞击发药和无腐蚀性击发药所代替。

2. 针刺药

当火工品（如火帽和雷管）接受针刺作用而爆发时，这种火工品称为针刺火工品，如针刺火帽、针刺雷管。这类火工品的最上层装药就是对针刺敏感的针刺药。

对针刺药的要求如同击发药一样，应具有适当的感度、足够的点火能力和适当猛度。除此之外，由于针刺药装在引信火帽和引信雷管中，故还要求它具有足够的安定性（发射时承受后坐力的能力）和化学安定性（受热，与容器金属物件的相容性）。

针刺药与击发药的组成很相似，主要由起爆药、氧化剂和可燃剂及一定量的钝化剂或敏化剂混合而成。常用的起爆药有雷汞、氮化铅和三硝基间苯二酚铅，敏化剂是四氮烯；氧化剂一般是硝酸钡、硝酸铅、氯酸钾等；可燃剂多用硫化锑、硫氰化铅、硅粉、硅铁粉或镁、铝粉等。

针刺药的感度主要取决于四氮烯的含量，猛度大小取决于雷汞或氮化铅的含量，火焰的长度主要由三硝基间苯二酚铅的含量来决定。近年来我国常采用结晶氮化铅与四氮烯的机械混合物组成的针刺药，同时也发展了含羧甲基纤维素氮化铅与四氮烯共沉淀的针刺药。它是一种氮化铅包覆在四氮烯外部的共沉淀混合物，这种针刺药优于其机械混合物。

2.1.3 对起爆药的要求

起爆药在导弹火工品中有着广泛的应用，为适应导弹作战环境，满足导弹火工品战术技术条件，所选用的起爆药必须满足下列基本要求。

（1）起爆药要有适当的感度。导弹火工品具有作用首发性和敏感性基本特征，火工品所装起爆药必须具有适当的感度，它既要易于被较小的、简单的初始冲能所引爆，可靠地完成导弹点火、状态转换及引信起爆功能，又必须保证在制造、装配、运输、使用及导弹发射过程中的安全。

（2）起爆药要有足够的起爆能力。在导弹火工品中，无论传爆序列还是传火序列，都对火工品的输出能力提出了相应的要求。起爆药的起爆能力越强，所做的功就越大，作用的可靠性就越高，同时所需的起爆药量越小，有利于火工品小型化，也符合导弹系统小型化发展趋势，并且随着起爆药量的减小，还能提高各种火工品使用、运输过程的安全性。

（3）起爆药要有良好的安定性和相容性。起爆药的安定性，是指炸药在储存条件下，抵抗外界条件的影响，保持其原存性质不变的能力。起爆药的安定性是由其自身的化学成分、结构决定的，但是受外界条件影响甚大。起爆药与其他物质一样，总是在随时间不断变化。各种起爆药由于其成分和结构不同，变化的速度有快有慢。变化速度越慢的，则安定性越好；反之，变化速度越快的，则安定性越差。起爆药受环境变化的安定性可分为物理安定性和化学安定性及相容性。物理安定性是取决于各种因素可能产生物理变化的趋势，如起爆药的吸湿性、挥发性等物理性能。化学安定性则取决于起爆药发生化学变化的速度，如受热、光等作用后产生分解的数量和速度，与金属壳体等材料长期接触不产生

化学变化等。起爆药的相容性，是指炸药与其他材料混合或者接触后，在混合体系或相接触物质之间保持不发生或发生不超过允许范围变化的能力。装药体系内起爆药与各成分之间的相容性称为内相容性；而装药与金属、油漆及其他材料相接触表面发生的化学作用称为炸药的外相容性。

由于导弹有较长的使用期，导弹火工品内部装药一般要求有效存放期为 20 年。起爆药良好的安定性和相容性，对于起爆药的制造、储存、使用等均具有十分重要的意义。

(4) 起爆药具有良好的流散性和压药性。因为起爆药都是压装到管壳中使用的，压装前要用容量法计量装到管壳中，由于每个管壳中装填的药量都不大，所以即使微小的误差也会影响到起爆药作用的可靠性。因此，为保证压药安全、装药均匀和性能可靠，起爆药应力求纯度高、颗粒均匀、表面光滑、假密度大，有流散性和压药性良好等特点。

2.2 猛炸药

猛炸药是以爆轰的形式对外界做功的一类炸药，爆炸变化的典型方式是爆轰，是爆炸性最猛烈、破坏威力最大的一类炸药。与起爆药相比，猛炸药具有感度低，爆轰过程的激发期长，爆速、爆热大，产生的气体多等突出特点。在导弹火工品中，雷管、导爆药柱、传爆药柱、扩爆药柱等起爆、传爆类火工品中都会装有猛炸药。

由于猛炸药具有较小的感度和较长的爆轰激发期，大部分猛炸药在通常条件下，不能被简单的初始冲量所起爆，而是用起爆药来激起猛炸药的爆轰。对于感度小的猛炸药还必须使用传爆药柱来起爆。传爆药柱是用起爆较敏感且威力较大的猛炸药制成的。

对火工品装填的猛炸药的基本要求是：

(1) 对撞击、热、摩擦、火焰、静电及射频等感度要低，以利于运输、储存及勤务处理安全。

(2) 对冲击波和爆轰波作用的感度要高，以易于起爆，保证作用可靠。

(3) 起爆临界直径要小，以利于完全起爆并传递爆轰波。

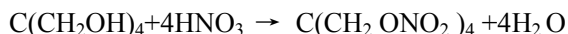
(4) 具有良好的威力和猛度等爆炸做功性能。

(5) 具有良好的物理、化学安定性和相容性，以利于长期稳定储存。

2.2.1 太安

太安，学名季戊四醇四硝酸酯，简称 PETN，是 1894 年由 R.Tollens 制得的。第二次世界大战期间，PETN 由于性质稳定、威力大，成为重要的高能炸药之一。

季戊四醇与硝酸发生酯化作用，生成季戊四醇四硝酸酚，即太安，分子式为 $C(CH_2ONO_2)_4$ ，相对分子质量为 316.2。



1. 物理性质

1) 外观

太安为白色结晶物质，钝化后的太安为玫瑰色。

2) 密度

太安的密度为 $1.77g/cm^3$ ，假密度为 $0.2\sim 0.3g/cm^3$ ，当压药压力为 $400\sim 450kg/cm^2$ 时，装药密度约为 $1.60g/cm^3$ 。不同压力下的装药密度如表 2-5 所示。

表 2-5 不同压力下太安装药的密度

压力/(kg/cm^2)	350	700	1400	2100	2800
密度/(g/cm^3)	1.57	1.64	1.71	1.73	1.74

3) 熔点

纯太安的熔点为 $141.3^\circ C$ ，所以不能用于注装。太安在室温下不挥发。在 $140\sim 145^\circ C$ 时，由熔化开始经过半小时后，太安即分解，同时放出氮的氧化物。

4) 溶解度与吸湿性

太安几乎不溶于水， $50^\circ C$ 时在 100g 水中能溶解 0.01g。太安在水中感度下降，所以可储存于水中。

太安能溶解于有机溶剂中，其中最好的溶剂是丙酮，所以常用丙酮重结晶法精制太安。此外，太安还能溶解在硝基苯、戊醇、梯恩梯和硝化甘油中。太安不吸湿。

2. 化学性质

1) 与酸碱作用

太安是中性物质，与碱长期作用时，会皂化。与 2.5% 的氢氧化钠溶液共煮沸，分解极为缓慢，在氯化亚铁溶液中煮沸则很快分解。含酸的太安很不安定，干燥和长期储存时可能自燃，因为酸可促进它的分解。

2) 与金属的作用

太安不与金属作用。

3) 与水的作用

在接近 $100^\circ C$ 时用水处理，太安发生水解。在 $125^\circ C$ 并加压时，水解进行得十分迅速，而当存于 0.1% 硝酸时，水解大大加快，主要生成季戊四醇二硝酸酯。酸性水解速度比稀氢氧化钠溶液引起太安水解的速度小。

4) 光的作用

太安在温度为其熔点以上时，用 480J 的闭光能和 $20\mu s$ 的延滞期可以使它发

生爆炸。太安也能被 γ 射线的照射而分解。

5) 热的作用

太安的热安定性不如梯恩梯好，但比特屈儿好。太安在常温下是安定的，放置 12 年无显著变化。当加热到熔点以上时会分解，在长期加热到 175°C 以上时，会冒黄烟而分解；温度达 $190\sim 200^{\circ}\text{C}$ 时，能引起自行分解而发火。

3. 爆炸性质

1) 爆炸反应方程式

太安的理论爆炸反应方程式为：



2) 感度

(1) 热感度：太安的 5min 爆发点为 215°C ，5s 爆发点为 225°C 。太安的火焰感度大，易于点燃，燃烧时发出明亮的火焰。少量太安点燃后能平静地燃烧，量多时（如超过 1kg）可能转变为爆轰。在密闭器中点燃，即使量少也可发生爆轰。

(2) 撞击感度：太安的撞击感度在标准落锤试验中为 100%（10 kg/25cm）。

(3) 摩擦感度：在摩擦摆试验中，其爆炸百分数为 92%~96%。

(4) 枪击感度：步枪射击时 100%爆炸。

(5) 爆轰感度：太安的极限起爆药量分别是对雷汞为 0.17g，对氮化铅为 0.03g。由于太安感度高，所以一般使用的太安都是经过钝化的。

3) 爆轰性能

爆热：6300kJ/kg。

爆温： 3627°C 。

比容：800L/kg。

爆速：密度为 $1.77\text{g}/\text{cm}^3$ 时的爆速为 8600m/s。

4. 毒性

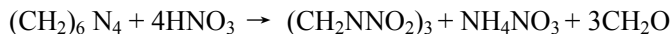
太安稍有毒性，能引起血压降低，呼吸短促，但因其蒸气压低且不溶于水，所以毒性不显著。

5. 用途

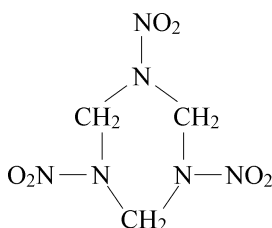
太安的威力较大，有良好的爆轰感度，它可用作雷管的次发装药。而由于它的临界直径和极限直径小，可以制成尺寸较小的雷管。由于太安的爆速较高且稳定性好，故用来制导爆索时爆速变化小，所以它被广泛用于导爆索的装药。

2.2.2 黑索金

1899 年 G.F.亨宁在合成医药时制得黑索金，1922 年 G.C.赫尔茨首先确认它是一种有价值的炸药，并成功地用硝酸硝化乌洛托品而制取。由于其爆炸性能好，原料来源丰富，已继梯恩梯之后发展成为现代武器弹药主要装药之一。



黑索金属于环状硝基胺炸药，学名三亚甲基三硝胺，简称 RDX (Research Department of Explosive)，是一种重要的单质炸药，分子式为 $C_3H_6N_6O_6$ ，相对分子质量为 222.1。其结构式为：



1. 物理性质

1) 外观

黑索金为白色粉状结晶，无臭无味。

2) 密度

黑索金的真密度为 1.816g/cm^3 ，假密度（堆积密度）为 $0.8\sim 0.9\text{g/cm}^3$ ，装药密度常为 $1.63\sim 1.7\text{g/cm}^3$ 。

若在黑索金中加入少量钝感剂，则在 2000kg/cm^2 的压力下，其压药密度可达 1.73g/cm^3 。

3) 熔点

纯黑索金的熔点为 205°C ，用直接硝解法制得的军用品熔点为 $202\sim 203^\circ\text{C}$ ，工业品（含 1% 的杂质）为 $201\sim 202^\circ\text{C}$ 。黑索金熔化时感度增高，还出现分解现象，所以不适于熔化注装，只能压装。

但黑索金能溶于熔融的多硝基芳香族碳氢化合物，并生成低共熔物。根据这一性质，将黑索金溶入熔融的梯恩梯中，组成“梯黑”熔合炸药广泛应用于导弹战斗部等装药中。

4) 溶解度与吸湿性

黑索金几乎不溶于水。它在水中的溶解度是： 0°C 时为 0.01%， 100°C 时为 0.15%。在水中感度下降，所以可存放在水中。黑索金易溶于丙酮、浓硝酸、热苯胺，微溶于醇、苯、氯仿、二硫化碳中，难溶于水、醋酸乙酯、四氯化碳。

5) 挥发性

黑索金不挥发。

2. 化学性质

1) 与酸碱作用

纯黑索金是一种中性物质，不与稀酸作用，浓硝酸在低温下能溶解黑索金（不分解），但用水稀释时又析出。稀苛性碱在加热的情况下，可使黑索金发生水解作用。

2) 与金属作用

纯黑索金不与金属作用。

3) 光的作用

黑索金在日光的照射下不分解，在紫外光照射下颜色由白色变成淡黄色，但不发生其他变化。

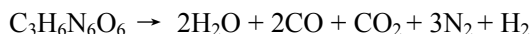
4) 热的作用

黑索金热安定性和储存安定性稍次于梯恩梯，但强于特屈儿。在 50℃ 下长期储存不分解。黑索金在 85℃ 下 10 个月、100℃ 下 100h、120℃ 下 48h，其质量与外观均无变化。190℃ 下半分解期为 270min。低温下黑索金与奥克托金的真空安定性相近，在高温下奥克托金的真空安定性比黑索金好。

3. 爆炸性质

1) 爆轰反应方程式

黑索金的理论爆轰反应方程式为：



2) 感度

(1) 热感度：黑索金的 5min 爆发点为 215~230℃，5s 爆发点为 260℃。

(2) 撞击感度：黑索金的撞击感度在标准落锤试验中为 80±8%。

(3) 摩擦感度：在摩擦摆试验中，其爆炸百分数为 76±8%。

(4) 枪击感度：黑索金的枪击感度大，用步枪射击时 100% 爆炸。

(5) 爆轰感度：黑索金的极限起爆药量分别是，对雷汞为 0.19g，对氮化铅为 0.05g。

3) 爆轰性能

爆热：6025kJ/kg。

爆温：3427℃（密度 1.79g/cm³）。

比容：907L/kg。

爆速：密度为 1.77g/cm³ 时的爆速为 8700m/s。

4. 毒性

黑索金是一种有毒物质。黑索金中毒途径主要通过消化道、皮肤和呼吸道，其中以消化道为主。

5. 用途

黑索金是一种爆炸威力较大、起爆感度较高、安定性好、原料丰富的军用炸药。但由于机械感度高，其压缩性较差，一般都不单独使用。目前纯黑索金主要用作传爆药、导爆索的芯药和雷管的次发装药。在弹药中应用时，都是采用经过钝化处理的钝化黑索金，或是黑索金与其他物质（或炸药）组成的混合炸药，其广泛地应用在传爆管、导弹聚能战斗部中。

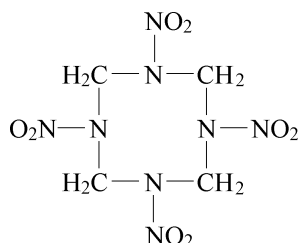
2.2.3 奥克托金

1941 年在以醋酐法制造黑索金的过程中发现了奥克托金。奥克托金是制造过

程中的副产物，后来发现它具有更大的爆炸力。其反应方程式为：



奥克托金学名环四亚甲基四硝胺，简称 HMX，是高熔点炸药。分子式为 $(\text{CH}_2)_4(\text{NNO}_2)_4$ ，分子量为 296.2。结构式为：



1. 物理性质

1) 外观

奥克托金为白色结晶物质。

2) 密度

奥克托金的密度 α 型为 1.846g/cm^3 ， β 型为 1.902g/cm^3 。当压力为 2000kg/cm^2 和 3500kg/cm^2 时，装药密度分别为 1.50g/cm^3 和 1.56g/cm^3 。

奥克托金的理论最大密度为 1.90g/cm^3 。

3) 熔点

奥克托金熔点为 $277\sim 280^\circ\text{C}$ ，是一种高熔点的炸药（所以耐热，也称耐热炸药），熔化时分解。密闭下分解温度为 210°C 。

4) 溶解性与吸湿性

与黑索金一样，奥克托金不溶于水，且不吸湿（空气温度为 30°C 及相对湿度 95% 时，吸湿量为零）。奥克托金几乎不溶于大多数有机溶剂。

5) 挥发性

奥克托金不挥发。

2. 化学性质

1) 与酸碱的作用

在水和 2% 的沸腾硝酸或硫酸中 6h 内不分解。浓硫酸能分解奥克托金，其分解速度比黑索金略慢，但随温度上升而急剧增大。奥克托金的碱性水解比酸性水解快得多，但速度要比黑索金慢。

2) 光的作用

照射含黑索金杂质的奥克托金，其熔点会大幅度下降（由 278°C 降至 244°C ），而且熔化时发生分解。纯奥克托金在日光下储存时，几乎不发生变化。

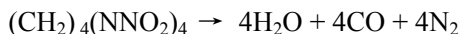
3) 热的作用

奥克托金具有很高的热安定性，与黑索金相比，它的热安定性高得多，在 220°C 的半分解期为 311min， 240°C 时为 84.5min。含有各种添加剂的奥克托金的

热分解速度比纯奥克托金高，说明这类添加剂能降低奥克托金的热安定性。与黑索金（作为杂质存在）及与梯恩梯组成混合炸药热安定性都比纯奥克托金低。

3. 爆炸性质

1) 爆轰反应方程式



2) 感度

(1) 热感度：奥克托金的 5min 爆发点为 291℃，5s 爆发点为 327℃。

(2) 撞击感度：在标准落锤试验中奥克托金的撞击感度为 100%。

(3) 摩擦感度：摩擦摆试验中爆炸率为 100%。

(4) 爆轰感度：奥克托金对氮化铅的最小起爆药量为 0.17g。

3) 爆轰性能

爆热：5629.5kJ/kg。

比容：908L/kg。

爆速：装药密度为 1.85g/cm³ 时，爆速为 8917m/s；密度为 1.894g/cm³ 时的爆速为 9110m/s。

临界直径：密度为 1.65g/cm³ 时，爆轰临界直径为 1mm。

4. 毒性

有轻微毒性。

5. 用途

奥克托金是一种高威力炸药，由于其化学结构类似于黑索金，因此爆速、爆压和同密度时的黑索金差不多，但其结晶密度比黑索金高，因此它能达到更高的爆速和爆压。目前它是高爆速炸药中综合性能较好的一种。它具有比黑索金更高的热安定性，可以在温度 150~200℃ 下使用。虽然其机械感度高达 100%，但可通过加入钝感剂降低，使之满足使用的要求。奥克托金是一种有发展前途的耐热炸药，在导弹火工品组件中有重要应用。

2.2.4 特屈儿

特屈儿化学名为 2,4,6-三硝基苯甲硝胺，代号 CE，分子式为 C₆H₂(NO₂)₃NNO₂CH₃，它是由二甲苯胺与硝酸作用制得的。

1. 物理性质

1) 外观

特屈儿为淡黄色晶体粉末。

2) 密度

特屈儿的真密度为 1.73g/cm³，假密度为 0.6~0.7g/cm³。特屈儿的密度随压力增大而增大，耐压性很好，当压力分别为 1100kg/cm² 及 1600kg/cm² 时，压装密度可达 1.58~1.61g/cm³ 和 1.63~1.65g/cm³。

3) 熔点

特屈儿熔点为 127.9℃，军品可达 128.75℃，熔化时分解，故不能单独注装。

4) 溶解性与吸湿性

特屈儿不吸湿也不溶于水，在乙醇中溶解度很小，在苯和二氯乙烷中的溶解度很大。

2. 化学性质

1) 与酸碱的作用

特屈儿不与稀酸起反应，但浓酸可使其分解。它能与碱反应，与苛性碱反应较快，通常用亚硫酸钠来销毁少量特屈儿。

2) 与金属作用

特屈儿不与金属起反应。

3) 热的作用

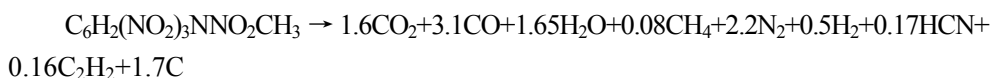
特屈儿的热安定性比梯恩梯稍差，100℃以上加热时，开始微弱的分解，半分解期为 211min。特屈儿在常温下储存 20 年，65℃下 12 个月，75℃下 6 个月，100℃下 100h，都无明显的分解变质现象。特屈儿与 68%的梯恩梯组成低共熔混合物，它们在 66~68.5℃下熔化。

3. 爆炸性质

特屈儿在空气中燃烧很剧烈，黑烟很少，如量多或在密闭容器内燃烧时可转为爆轰。特屈儿的感度与威力都比梯恩梯大，尤其是它的爆轰感度比梯恩梯大得多（数倍）。

1) 爆轰反应方程式

特屈儿爆炸时按下式分解：



2) 感度

(1) 撞击感度：48±8%。

(2) 摩擦感度：16±8%。

3) 爆轰性能

爆发点：190~200℃/5min，257℃/5s。

爆热：4545.3kJ/kg。

比容：740L/kg。

爆温：3527℃。

爆速：装药密度为 1.65g/cm³ 时，爆速为 7446m/s；密度为 1.7g/cm³ 时，爆速为 7573m/s。

4. 毒性

特屈儿有毒，能刺激皮肤，并使皮肤着色。空气中粉末含量不能超过 15mg/m³。

5. 用途

特屈儿是属于中等威力的猛炸药。它的感度与威力都比梯恩梯大，尤其是具有较好的爆轰感度。特屈儿的威力、猛度都高于梯恩梯，而且有良好的爆轰感度，目前主要用作导爆药和雷管的次发装药及传爆药。因为特屈儿的原料（苯二甲胺）来源不足，又加上它有强烈的毒性，国内没有大量生产，所以在很多方面为黑索金所取代。

2.3 点火药

在导弹武器系统中，助推器点火、主发动机点火、弹翼展开作动装置启动等，都需要点火类的火工品，而点火功能的完成，其主要能源来自火工品内部装填的点火药。点火药是用来引燃火工药剂、烟火药剂、推进剂及发射药的药剂，多为混合药剂，通常由氧化剂、可燃剂和黏合剂均匀混合而成。对点火药的要求是物理、化学性能稳定，对热冲击敏感，点火能力强且作用可靠，可装填于点火、传火等各种点火器件中。常用的点火药有 CP[高氯酸·五氨·(5-氰基四唑)合钴(III)、BNCP(高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(III))。

点火药按性能可分为有气体、微气体及无气体等多种类型。有气体点火药，燃烧时产生大量气体，黑火药是这种点火药的典型代表，其特点是易引燃，点火能力强，广泛用于各种点火具。无气体点火药，燃烧后不生成气体，它的燃烧反应在固相中进行，主要组分有铅/硒、铅/碲、锆/氧化铁/硅藻土、金属互化物等，用于要求不产生气体的特殊点火具，如点燃液体能源等。

1. 黑药

黑药是黑火药的简称，因其颜色为黑色而得名，又因它在燃烧时有大量烟生成，故又称有烟药。黑药是我国古代四大发明之一，早在汉末三国时期就已用于军事上。在 19 世纪以前的一段很长历史时期，黑药是弹药中唯一使用的药，它既作起爆药、猛炸药，又作发射药、烟火剂。在导弹武器系统中，黑药多作为点火药（传火药）使用，装填于导弹点火工具中，以保证能迅速点燃全部发射药。

1) 组成

黑药由硝酸钾、木炭和硫磺混合而成，军用黑药中，各成分的比例一般为：硝酸钾 75%、木炭 15%、硫磺 10%。制作时先按配比将各成分分别粉碎，然后经混合、压实、造粒、磨光、筛选等工序制成黑药，最后进行包装。

2) 分类

黑药按粒度大小可分为以下几种。

1#大粒黑药：用孔径为 10mm 的铜筛过筛，其筛上物不大于 5%，5mm 筛的筛下物不大于 5%。

2#大粒黑药：用孔径为 6mm 的铜筛过筛，其筛上物不大于 5%；2.8mm 筛的筛下物不大于 5%。

1#小粒黑药：用 4 孔/cm 的铜筛过筛，其筛上物不大于 2%；8 孔/cm 筛的筛下物不大于 5%。

2#小粒黑药：7 孔/cm 筛上剩余物不大于 2%，11 孔/cm 筛的筛下物不大于 3%。

3#小粒黑药：9 孔/cm 筛上剩余物不大于 2%，15 孔/cm 筛的筛下物不大于 3%。

4#小粒黑药：14 孔/cm 筛上剩余物不大于 2%，19 孔/cm 筛的筛下物不大于 3%。

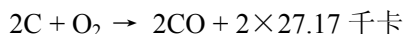
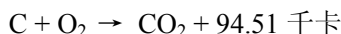
3) 各成分的作用

(1) 硝酸钾为氧化剂。加热至 350℃时，分解反应如下：



分解出来的氧，使木炭和硫磺燃烧，从而生成 CO、CO₂、SO₂ 等气体，并放出热量。

(2) 木炭为可燃物。制造黑药的木炭含碳量在 72%~80%，碳与氧反应，生成气体，放出热量。



(3) 硫在黑药中作用有三：

① 作黏合剂：加热后（95~107℃）硫可使黑火药中各成分黏合在一起，使黑药具有一定的强度，以保证黑药在使用、保管、运输中不易破碎，使之有良好的燃烧性能，保持燃速不变。

② 作可燃物：硫与氧作用，生成气体，放出热量。



③ 使黑药容易点火：当黑药受火焰作用时，其中的硫容易形成蒸气。硫蒸气在较低温度（150℃）下，就能和木炭、硝酸钾互相反应，生成硫化钾、氧化氮等物质。同时在反应中放出的热量又能使黑药温度升高，所以易于点火。

4) 黑药的主要性质

(1) 物理性质。

黑药的颜色为蓝黑色或灰黑色，有粉状和粒状两种。粒状的表面光滑有光泽。黑药的密度一般为 1.6~1.65g/cm³，假密度为 0.87~1.1g/cm³。

(2) 安定性。

吸湿性：黑火药比较容易吸湿。主要原因：一是黑药本身为粉状或粒状物质，具有较大的表面和毛细孔，容易吸附水分；二是由黑药成分决定的，木炭本身为多孔性物质，因表面吸附和毛细管作用而吸湿；三是黑药中的硝酸钾往往含有硝酸钠等较易吸湿的杂质。军用黑药含水量一般为 0.7%~1.0%，但随着吸湿而含水量增加，将对黑药燃烧性产生不利的影响，见表 2-6。

表 2-6 黑药吸湿对其燃烧性能影响

含水量/%	对黑药燃烧性能影响
0.7~1.0	含水量在此范围以下时，黑药质量不受影响，在纸上点燃时，能迅速燃烧，不会将纸烧穿，燃烧后不在纸上留残渣
2~4	点火困难，燃速减慢，但干燥后燃速变化很小，所以仍可使用
4 以上	部分硝酸钾溶解析出，使药的成分均匀性变差，点火困难，燃速更慢，只能作爆破用
15 以上	不能点燃，失去燃烧能力，成为废品

热安定性：黑药各成分都很安定，所以黑药在常温下不易分解，热安定性良好。

(3) 爆炸作用。

黑药的发火点 $290\sim 310^{\circ}\text{C}$ ，火焰感度很大，很易被火焰点燃。粉状药比粒状药更易点燃，密度小的比密度大的更易点燃。

黑药的机械感度也较大，受到较强的冲击时，即可发火或爆炸。黑药摩擦感度也较高，将它放进两块木板间摩擦就可以发火。当黑药受到速度超过 500m/s 的枪弹穿射时会爆炸。

黑药的爆温： 2100°C 。

密度为 1.8g/cm^3 的黑药，燃速为 $7\sim 10\text{mm/s}$ 。

5) 影响黑药性质的主要因素

(1) 原材料对燃速的影响。黑药的原料中以木炭性质对燃速影响最大。用硬质木炭发火点高，燃速偏低，用质地疏松的木炭发火点低，燃速快。

(2) 各成分比对燃速的影响。硫的含量如果不变，改变 KNO_3 和木炭的含量，则燃速发生变化。如果使 KNO_3 含量不变，改变硫和木炭的含量，燃速也有较大变化。

在一定范围内，减少木炭的含量，无论硝酸钾的含量是增加还是不变，都会使燃速减慢，严重时甚至熄灭。这是因为木炭被氧化成 CO_2 时放出热量，随着木炭含量减少，燃烧放出的热减少，促使反应速度减慢。木炭含量降到某一数值就不能燃烧。增加 KNO_3 含量，可以提供更多的氧，但木炭太少，燃烧放出的热量一方面被 KNO_3 分解吸收，另一方面用于火药加热层的升温。这样由于木炭量太少，放出的总热量太少不能维持燃烧。为保持黑药良好的燃烧特性，必须严格控制各组分的比例。

(3) 密度的影响。当黑药的密度比较小时，燃烧速度较快，而且燃烧无规律性。这是因为密度小时，燃烧时火焰容易钻入内部空隙，使燃烧面积迅速扩大，故燃速较快，且无规律性。

当黑药的密度增大时，燃速明显减慢，当密度达到 1.90g/cm^3 时，黑药的燃速几乎不变，这时黑药表现出有规律的燃烧，即按平行层规律进行燃烧，这是黑药燃烧的一大特性。

(4) 水分对燃速的影响。在一般情况下，黑火药的燃速随着水分含量的增大而减慢。当黑药含水量为 2%~4% 时，点火就困难，燃速明显下降；当含水量超过 4% 时，由于 KNO_3 的溶解，致使成分的均匀性破坏而影响燃速；当水分含量达 15% 时，就不能点燃，完全丧失燃烧能力。所以通常规定黑药水分含量为 0.7%~0.9%。

(5) 温度对燃速的影响。黑药的燃速随着温度的升高而加快。通过在时间药盘上做高低温试验，得到结果是温度每改变 1℃ 时，燃烧时间增加(或减少)0.025s。

(6) 压力对燃速的影响。黑药的燃速随大气的压力升高而增大，随压力的减小而降低，当大气压力降到 $4 \times 10^4 \text{Pa}$ 以下时，时间引信中的黑药将趋于熄灭。

2. 高分子复合火药

高分子复合火药是由高分子化合物作可燃物兼黏合剂，用硝酸盐、过氯酸盐或有机炸药等作氧化剂，加入适量的其他附加物（主要是高能添加剂）混合而制成的。

1) 氧化剂

氧化剂是高分子复合火药的主要成分之一，它的作用是提供可燃物燃烧时所需要的氧，其重量占总药量的 60%~80%。为了满足火药的要求，氧化剂应具备以下条件：含有较高量的有效氧；分解产物有大量气体，应无或少固体生成物；比重大，物理化学安定性好，机械感度小，原料丰富，价格低。

高分子复合火药中的氧化剂，使用最多的是过氯酸铵，因为它的安定性较好，分解产物全是气体，爆容大，生成热低，综合性能较好。虽然硝酸钾感度低，生产安全，原料丰富，但能量低，而且在使用温度范围内有晶型改变，导致体积变化，因而限制了它的大量使用。

2) 可燃物（兼黏合剂）

某些高分子化合物，如聚硫橡胶、聚氯乙烯、醇醛树脂、端羟基聚丁二烯等，既是可燃物又是黏合剂。在聚合物内，常引入一些高能氧化基团或高热高能值基团，如加入硝基、硝酸酯基、过氯酸根、含氟基团和硼、铵、铝元素等，就可制成高能可燃物，如硝基聚氨酯、硝基聚乙烯等。

可燃物（兼黏合剂）的含量约占火药总重量的 15%。它是火药结构的主体成分，保证火药具有一定的机械强度。

3) 附加物

(1) 为了提高复合火药的能量，常加入铝、镁、硼粉等高能添加剂。

(2) 为了改善药柱的机械性能，常加入增塑剂、硬化剂、增强剂、固化剂等。

(3) 为了改善火药的燃烧性能，常加入燃烧催化剂和稳定剂等。

(4) 为了改善工艺性能，常加入工艺附加物，如强润剂、表面活性剂等。

3. 点火药选择

点火药是点火能量释放系统的核心，点火药的选择要与点火装置的类型相匹

配。对于烟火剂型点火装置，应用较多的是烟火剂、黑火药、聚四氟乙烯加镁粉，或后两者的混合点火药。其规格有粒状的、环形的、片状的或球形的等。对于点火发动机，主要采用高燃速推进剂，各种药型都可以应用。

黑火药热感度高，易点燃，发火点约为 570K，燃烧产物中有 60% 的炽热固体微粒，提高了接触导热和辐射传热的效果。其缺点是易造成较大点火压强峰值。现在已很少单独采用黑火药作点火装置装药，常常把它作为加强药使用，例如，用少量黑火药点燃聚四氟乙烯加镁粉点火药。只在用量很小时，才考虑用黑火药作点火药。硼-硝酸钾（B-KNO₃）低压下易点燃，燃气中气体含量较多，适合高空点火及自由容积较大的固体发动机点火。

镁-聚四氟乙烯点火药，低压下容易点火，燃气中气体量较小，一般不会形成较大的点火压强峰，其发火温度较高，通常需要有加强药帮助点燃，适用于自由容积小及采用丁羟推进剂药柱的固体发动机点火。

高燃速推进剂用于点火发动机，适于大固体发动机或长径比较大的固体发动机点火。

2.4 延期药

在导弹的续航发动机点火、引信延时起爆控制等许多场合，需要用到延期火工元件，以控制由点火至爆炸所需要的时间，此类火工品中通常装填有延期药。延期药一般由火焰点燃后，经过稳定的燃烧来控制作用时间，以引燃或引爆下一个火工元件，主要用于各种延期体包括延期雷管中。

延期药分为有气体延期药和微气体延期药。如黑药就是常用的有气体延期药，微气体延期药主要有钨系、硼系、锆系等，又简称微烟药。微气体延期药的特点是燃烧时产生的气体很少，甚至基本上不产生气体，因而受气体及大气压力影响不大，燃烧稳定，延期精度高。这样就解决了黑药燃速受大气压力影响大、在低压下会熄灭等问题。因此，微烟药是导弹火工品中较为理想的延期药。

1. 延期药的组成

延期药是由氧化剂、可燃剂和黏合剂组成。

1) 常用的氧化剂

氯酸盐和过氯酸盐：KClO₃, KClO₄。

铬酸盐和重铬酸盐：BaCrO₄, PbCrO₄, K₂CrO₄, BaCr₂O₇。

过氧化物和氧化物：PbO₂, Pb₃O₄, BaO₂, Fe₂O₃。

2) 常用的可燃剂

金属可燃剂：Mg, Al, Mo, Zr, Sb, Ti 等。

合金可燃物：Fe-Si, Zr-Ni, Ca-Si。

非金属可燃物：Si, S, Se, Be, Te。

硫化物可燃物： $\text{Sb}_2\text{S}_3, \text{Sb}_2\text{S}_5$ 。

3) 黏合剂

常用的黏合剂有：硝化棉、虫胶、松香、亚麻油、酚醛树脂、聚硫橡胶及其他高分子物质。

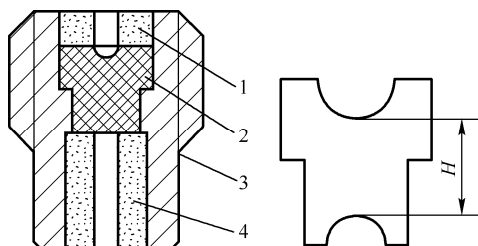
上述成分经过高度细研，然后按一定配比均匀混合，经过造粒，再压入时间药盘中（如作解脱保险药柱，则压成一定高度的药柱）。延期药的缺点，是它的点火能力和火焰感度差，为此在使用时，通常在药盘的头、尾部再压上少量的点火药（如黑药或其他点火药），来加强其火焰感和点火能力。这种点火药称为加强药或扩焰药。

例如，硼系短延期药的成分如表 2-7 所示。

表 2-7 硼系短延期药的成分

配方顺序 原料名称	1#美国 (%)	2#德国 (%)	3# (%)	4#德国 (%)
B (无定型)	0.5~3	0.5~3	5	10
四氧化三铅 (Pb_3O_4)	99.5~97	99.5~97	95	90
造粒剂	0.5~1.5			

用于延期作用的延期管及延期药柱如图 2-3 所示。一般将其装在火帽与雷管之间的通道中，利用延期药柱燃烧时间，达到延期作用的目的。



1—上接力药柱；2—延期药柱；3—延期管壳；4—下接力药柱。

图 2-3 延期管及延期药柱

延期药是根据需要延期的长短，压成一定高度及一定密度的实心药柱。延期药柱与管壁要贴紧，防止延期药燃烧时，火焰从管壁与药柱之间空隙穿过，破坏延期药的燃烧规律，以保证延期作用。

在延期药柱的上下方各有一个半球形凹槽，各由工具尺寸决定。上凹槽使露出药的面积大，药柱易点燃，下凹槽是为了燃烧过后的火焰集中，以加强火焰强度，增加点火能力。两凹槽之间的距离 H 的大小，对延期时间起关键作用。

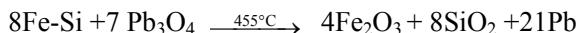
上下接力药柱（点火药与加强药）是中心有孔的药柱，所用的药剂与延期药

相同，只是压得较松，中间留孔，这样容易点燃。火焰由中心孔向外燃烧是增面燃烧，因此燃烧很快，不影响延期时间。上接力药柱的作用使延期药易于燃烧，而下接力药柱可增强延期药的火焰强度，所以又称加强药柱。

延期管的燃烧时间精度，可用散布范围的大小来衡量。在导弹发射时，可用时间来计算或用距离来计算。静止试验时，散布范围可由与平均燃烧时间的差额的平均值来计算，或由最长与最短燃烧时间之差来决定。影响时间精度的因素很多，如压药的密度、药柱的高度误差、燃烧的压力温度的变化，以及药剂温度的改变等。温度改变对延期药燃烧时间的精度影响明显。由于延期药或多或少有吸湿性，所以必须将引信密封保管。

2. 延期药的燃烧机理

以低燃速硅铁延期药为例，氧化剂为 Pb_3O_4 ，可燃剂为 Fe-Si 。延期药的燃烧产物是固体，为微气体延期药，除黏合剂在燃烧时产生少量气体外， Pb_3O_4 在一定温度下也要分解出气态氧。延期药反应基本上是气态氧和 Fe-Si 作用的过程，所以，发火温度应足以使 Pb_3O_4 分解放出氧，反应方能持续进行。一般来说，发火温度与氧化剂的分解温度有很大关系。 Pb_3O_4 的分解温度为 570°C 左右，但硅铁延期药的实际发火温度为 455°C 左右。这说明药剂发火温度不仅由氧化剂决定，还可能与可燃剂的性质、粒度、配比、密度、黏合剂及含量等因素有关。 Fe-Si 与 Pb_3O_4 的反应方程式为：



3. 燃烧性能影响因素

1) 原料纯度影响

纯度高，燃速快，精度好。原因是纯度高，含氧多，易分解。

2) 原料细度影响

细度高，燃速快，精度好（细而均匀）。原因是可燃剂细，易燃烧；氧化剂分解易放氧，细度影响小。

3) 延期药密度影响

密度大，燃速慢，精度高。原因是龟裂减小，振动燃烧减弱。

4) 延期药药量及装药长度影响

药量增加，药柱长度增加，燃烧时间变长，精度相对提高。原因是由药高造成的误差相对下降。

5) 延期药湿度影响

含水量增加，燃速变慢，所以延期药湿度不大于 0.1% 。

6) 引火药头药量影响（气室压力 3MPa 以上）

药头大，点火能力强，着火延滞期短；气室压力增大，燃速加快。

7) 装药直径影响

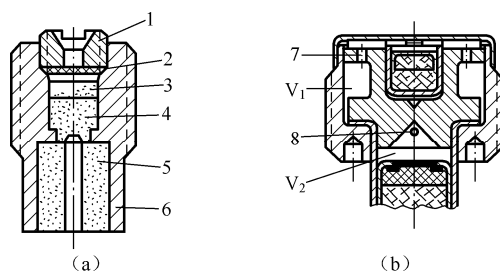
装药直径小，燃速慢，如小于临界直径，燃烧会熄灭。

4. 延期药在导弹引信中的应用

引信中常用的延时机构有火药延时机构和小孔气动延时机构等。

火药延时机构利用延期药柱的平行层燃烧来延迟火帽火焰向雷管传递时间，实际上是一个火药延期管，如图 2-4 (a) 所示。它的装药由引燃药柱、主延期药柱和接力药柱组成。主延期药柱是控制延长时间的的基本装药，通常延期时间不低于 0.001s。

小孔延期机构是根据气体动力学原理设计的，图 2-4 (b) 所示为其一种形式。这种延期机构的工作过程是，火帽的火药气体在火帽所在的空室膨胀后，穿过两个小孔 7 进入第一空室 V_1 ，气体在第一空室 V_1 中膨胀后，经斜孔 8 传到第二个空室 V_2 。当 V_2 室聚有足够热量和压力时，雷管即被引爆。



1—调节螺栓；2—纸垫；3—引燃药柱；4—主延期药柱；5—接力药柱；6—壳体；7—小孔（两个）；
8—斜孔； V_1 —第一空室； V_2 —第二空室。

图 2-4 延时机构

本章小结

本章着重介绍了火工品药剂的组成、物理化学性质和爆炸特性，涉及常用的起爆药、猛炸药、点火药和延期药等。

火工品药剂作为一种特殊能源应用于各类武器弹药，其能量来自内部药剂在爆炸变化时所释放的能量。火工品作用的可靠性和使用的安全性均与所装火工药剂的类别及其性能相关。因此，本章内容是学习导弹火工品的专业基础，对全面掌握导弹火工品各项性能有着重要的作用。

思考题

1. 起爆药与猛炸药的区别是什么？
2. 对起爆药的基本要求有哪些？
3. 试分析影响延期药燃速的主要因素。

第3章 典型导弹火工品

火工品是导弹武器系统的重要组成部分，从导弹发射、飞行姿态调整到毁伤目标都离不开火工品的作用。火工品在导弹武器系统中的功能主要有：用于导弹武器的点火、传火、延期及飞行控制，保证动力系统安全、可靠地运行；用于导弹系统的推、拉、切割、分离、抛撒和姿态控制，实现导弹自身调整或状态转换与安全控制；用于导弹系统的起爆、传爆及其控制系统，以控制战斗部的作用，实现对敌目标的毁伤。本章将介绍典型导弹火工品的基本结构、组成及工作原理。

3.1 点火类火工品

在常用的导弹发动机中，无论是固体火箭发动机、空气喷气发动机还是整体式火箭/冲压发动机，都需要相应的点火类火工品完成点火功能，它是导弹发动机工作的启动装置。此类火工品能在极短时间内可靠地点燃发动机的主装药，使发动机开始稳定的工作。点火类火工品通常由发火系统（主要是发火管）、能量释放系统（主要是点火药）和连接件组成。导弹发动机点火一般用强迫点火方法，即给装药以初始能量，激发装药点火直至使装药正常燃烧。点火装置的工作原理是：通常由电源启动点火，即通电使发火系统的电发火管工作，将能量传给能量释放系统的点火药。点火药在极短时间内产生大量炽热燃气，包围并加热主装药表面，使主装药瞬时全面点燃。点火类火工品是最易出现事故和故障的部件。为了保证使用安全，防止偶然的非点火信号引起的意外点火，有时在点火装置中还要附加安全保险机构。对点火装置及安全保险机构的基本要求如下：

- (1) 点火迅速、可靠，通常要求点火延迟时间小于 0.15s。
- (2) 对点火装置的质量、直径、长度和点火电流的限制。
- (3) 点火位置分为头部点火、中部点火或者尾部点火。
- (4) 对点火装置壳体的某些特殊要求是烧熔或不烧熔等。
- (5) 具有较小的点火压强峰值。
- (6) 点火装置具有一定的防静电、防射频的能力，并具有可靠的密封性。
- (7) 具有较好的使用安全性。对附加的安全保险装置的要求是：体积小、质量小、工作可靠，当接收点火信号时，能保证发火系统和能量释放系统正常工作；而接收非点火信号时，又能保证点火装置不工作，或发火系统虽工作，而能量释

放系统却不工作。

导弹发动机常用的点火装置主要有烟火剂点火器和点火发动机。中小型发动机常用烟火剂点火器，而大型发动机则采用点火发动机。此外，隔板点火器在现代导弹发动机点火系统中也有广泛的应用。

3.1.1 烟火剂点火器

烟火剂点火器是导弹固体火箭发动机常用的点火器，一般由发火管、点火药柱、点火药盒、电源接线和插座等组成。根据发火系统、能量释放系统及连接件的组合关系，烟火剂点火器可分为整体式点火器、分装式点火器和组合式点火器三种类型。

3.1.1.1 整体式点火器

整体式点火器是将其发火管与点火药做成一体，放置在点火药盒内，将导线引出与弹体的电极部分相接，如图 3-1 所示。为了保证点火的可靠性，一般都采用两个或两个以上并联的电发火头。这种点火器具有结构简单、点火滞后期小、点火延迟时间较短的优点。缺点是发火管损坏时，整个点火器损坏，不经济。该类型点火器常用于小型导弹发动机上。

黑火药是目前广泛应用的一种点火药。小型导弹发动机常用的是 2# 小粒黑火药；大型发动机则常用 1# 大粒黑火药作主药包，2# 小粒黑火药作辅助药包，同装在一个点火药盒里。但是黑火药的能量较低，燃速不够快。为了改善这方面的性能，在黑火药中添加一些铝、镁等金属粉，或者用金属粉加过氯酸盐组成的烟火剂作点火药。它们虽然改善了黑火药能量低和点火延迟时间长的缺点，但是铝粉易氧化，镁粉易吸潮，也带来了储存和使用性能不够稳定的问题。

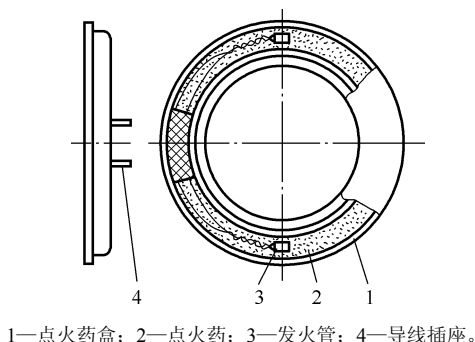
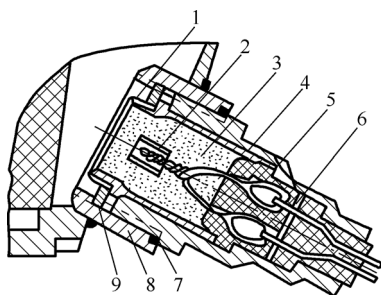


图 3-1 整体式点火器（一）

另一型整体式点火器的结构如图 3-2 所示。在导线的脚线上焊有由电阻构成的电桥，其上浸蘸着以热敏火药制成的引火剂药头，其外表涂上胶起保护作用，并套以塑料管。电桥材料常采用 0.05mm 左右的铂铱合金或镍铬合金丝。电发火管是常用的一种发火管，在发火电流的作用下应保证可靠发火。

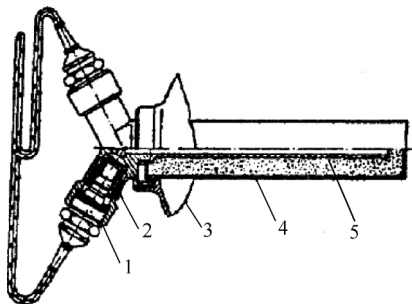


1—铝箔片；2—发火管；3—点火药；4—药室；5—连接座；
6—插销；7—密封圈；8—点火器固定座；9—锁定螺圈。

图 3-2 整体式点火器（二）

3.1.1.2 分装式点火器

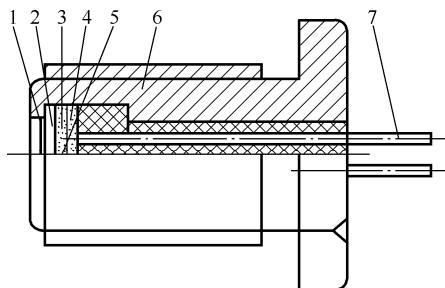
分装式点火器的发火管与点火药是分别安装的，如图 3-3 所示。该点火器的优点是更换损坏的发火管时，不会损坏点火器的其他部件，不像整体式点火器需要更换整个点火器。因此它具有良好的经济性，点火药与发火管可以分开储存和运输，安全性好。其缺点是点火滞后较大。分装式点火器一般用于大中型自由装填式发动机上，尤以助推器应用较多。



1—点火器电缆及插头；2—电发火管；3—固定支架；4—点火器；5—点火药。

图 3-3 分装式点火器

电发火管的结构如图 3-4 所示。



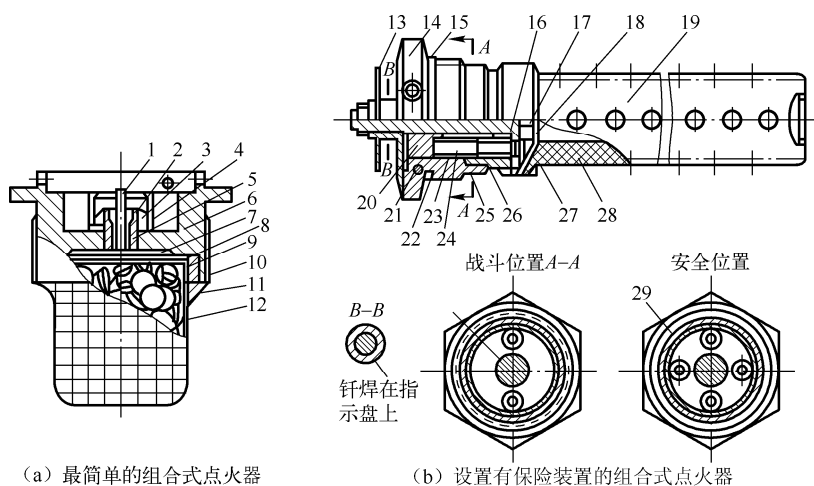
1—密封胶；2—盖片；3—第二装药；4—第一装药；5—桥丝；6—壳体；7—脚线。

图 3-4 电发火管结构

3.1.1.3 组合式点火器

1. 组成及结构

组合式点火器的发火管与点火药盒组合在一起，但发火管与点火药不是一个整体，发火管不放在点火药盒内，如图 3-5 所示。图 3-5 (a) 是最简单的组合式点火器；图 3-5 (b) 是一种设置有保险装置的组合式点火器，平时处于“安全”位置；工作时，旋转指示盘中心的杆件，对准“战斗”位置。



- 1—接触杆；2—压紧片；3—绝缘片；4—电桥；5—发火药；6—连接座；7—加强药；8—锡箔；9—隔板；
10—点火药；11—塑料；12—金属网；13—指示盘；14—连接座；15—密封圈；16—橡皮垫；17—引燃药；
18—隔板；19—塑料外壳；20—灌封料；21—导线；22—烧结玻璃；23—玻璃钢柱；24—桥丝；
25—发火药；26—加强药；27—垫圈；28—点火药；29—圆柱销。

图 3-5 组合式点火器

2. 点火安全保险装置

点火安全保险装置是固体火箭推进系统的组成部分。它与固体火箭发动机的重要组成部分之一的点火装置有重要关系，是发动机点火装置的安全保险机构。

电发火管是点火装置中最敏感的元件。人体的静电及一些塑料制品、皮毛制品的静电，雷达、电台和高压线路的电磁辐射造成的强磁场，以及战场和武器系统的杂波和电流等，都可能引起发火系统的意外发火。从发火系统内部改善发火管的安全特性，诸如钝化处理等是提高安全性的重要措施。除此之外，采用点火安全保险装置也可有效提高发动机的安全性。

通常采用屏蔽措施来防止静电感应和射频电磁感应，或在点火线路中安装滤波装置来排除点火信号以外的干扰信号，这种措施称为电安全保险装置；而采用机械机构的方法，在发火系统与能量释放系统之间加一机械式安全机构，隔断发火燃气流去点火室的通路，来防止意外发火造成发火管火焰窜入点火药盒，从而保证发动机推进剂药柱不被点燃，不致引燃整个点火装置；而正常点火时又能保

证点火通道畅通，实施这种措施的结构称为机械式安全保险装置。

1) 电安全保险装置

目前，常用的防射频的点火安全保险装置是在点火线路中串联低通滤波器，主要由电容、电感组成。它能保证在一定的频率范围内的正常点火信号电流以较小的衰减通过，而对于干扰信号电流以很大的衰减通过。两个电感和两个电容组成的 LC 低通滤波器如图 3-6 所示。

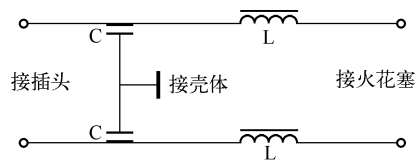


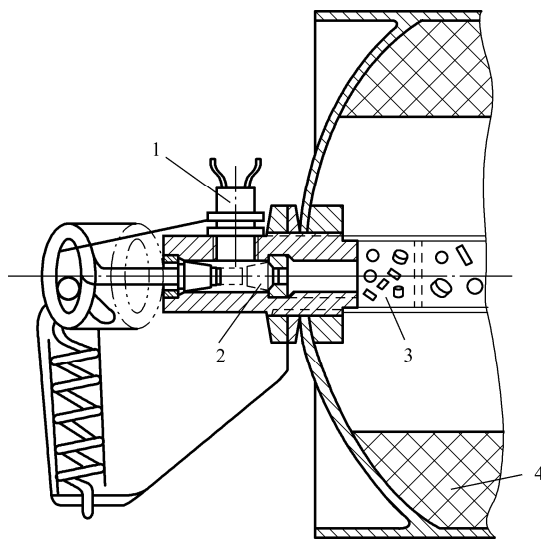
图 3-6 LC 低通滤波器原理图

2) 机械式安全保险装置

除了采用电安全保险装置外，还采用机械式安全保险装置，以防止电发火管的意外发火事故。在许多导弹所使用的固体火箭发动机均采用机械式安全保险装置。目前广泛采用的机械式安全保险装置有堵塞火道和火道错位两种。

(1) 堵塞火道安全保险装置。

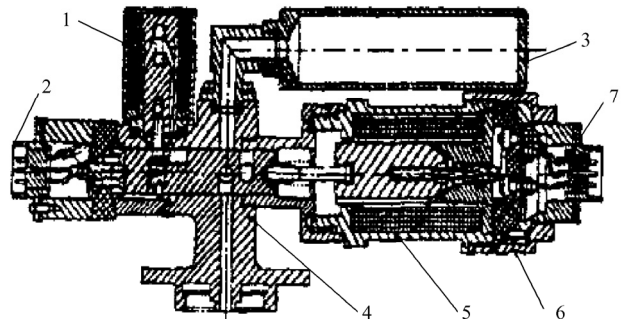
堵塞火道的方法是在点火装置的火焰通道中设有诸塞，此堵塞也可移动，使点火通道被堵或通畅，从而使点火装置处于安全或正常点火状态，一般是人工操作。图 3-7 所示为堵塞火道的点火安全保险装置。图中虚线位置为安全状态，处于实线位置为点火状态。



1—电发火管；2—堵塞；3—点火装置；4—发动机。

图 3-7 堵塞火道的点火安全保险装置示意图

电磁式点火安全保险装置具有类似的工作原理，都是通过若干机械对接。接通火路时为工作状态；切断火路时为安全状态，相当于一个应用于固体火箭发动机特殊用途的电磁阀或电动阀。电磁式点火安全保险装置结构如图 3-8 所示。



1—锁紧装置；2—点火插座；3—贮气瓶；4—发火管座；5—保险装置；6—指示装置；7—控制插座。

图 3-8 电磁式点火安全保险装置示意图

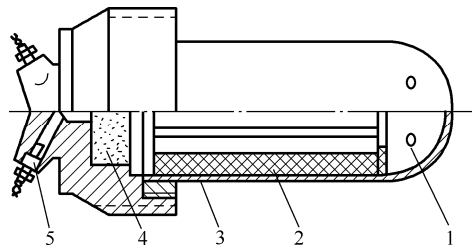
(2) 火道错位安全保险装置。

火道错位的方法是使点火装置中火焰通道错位或连通，从而达到安全或正常点火的目的。当点火装置处于安全状态时，其电发火管与点火药盒的火焰通道机械地错开一个角度，当电发火管意外引燃时，火焰不能进入点火药盒；而当点火装置处于正常点火状态时，电发火管与点火药盒的火焰通道轴向对准，此时电发火管引燃后，使火焰通畅地传入点火药盒。

上述三种结构形式的点火器都是由发火系统、能量释放系统及连接件组成的。发火系统主要是电发火管，电发火管的基本元件有电桥丝、发火药及脚线等。电桥丝采用镍铬合金丝、康铜丝和铂铱合金丝制成。点火药有黑火药、烟火剂等。

3.1.2 点火发动机

大型固体火箭发动机由于药柱尺寸大，一般的点火器对这种大尺寸发动机的点火已无能为力。通常采用点火发动机来点火，点火发动机原理结构如图 3-9 所示。该点火器稳定可靠，发火持续时间长，能量大，目前即使在较小的固体火箭发动机上也受到重视。



1—点火发动机喷孔；2—装药；3—壳体；4—点火药盒；5—点火嘴和发火管。

图 3-9 点火发动机示意图

点火发动机与烟火剂点火器相比具有明显的特点：

(1) 点火发动机的点火燃气流量和持续时间可以严格控制，而且还可以按设计要求使点火燃气按一定的方向喷射。

(2) 可采用主装药所用的推进剂作点火药，不必采用昂贵的高能烟火剂。

(3) 由于点火发动机由装药燃烧，因此不会出现局部高压和爆燃。

点火发动机实际上是个小型发动机。点火发动机的点火就是采用烟火剂点火器，当然它不需要喷管，而是喷嘴。点火发动机的装药多为大燃面的内孔燃烧药形。

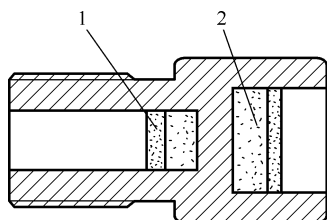
3.1.3 隔板点火器

在发动机与助推器共体的导弹联合动力系统中，防止发动机或助推器燃烧室气体回漏是一个必须解决的问题。由于隔板点火器密封性能极好，因此在导弹固体和液体火箭发动机的点火装置中有着广泛应用。

3.1.3.1 传爆机理

隔板点火器是通过金属隔板传递冲击波能量的火工品。它主要由施主装药、受主装药和带有隔板的壳体三部分组成，结构如图 3-10 所示。其作用过程是金属隔板一侧的施主装药爆炸所形成的冲击波通过金属隔板的衰减传递后，引爆另一侧的受主装药，再经过内部传火传爆系统，完成预定的功能。隔板点火器主要特点是能长时间地耐高压高温而不穿孔，保持了结构的密封和完整，防止气体反向泄漏。隔板点火器主要用于固体火箭发动机的非电点火。作用时，隔板点火器外壳完整无损，可保持点火腔的密封性；可用燃气、导爆索等非电刺激激发，而不必设置电点火源，且不受静电、射频影响，因而具有良好的安全性。

隔板传爆原理如图 3-11 所示。



1—受主装药；2—施主装药。

图 3-10 隔板点火器结构示意图

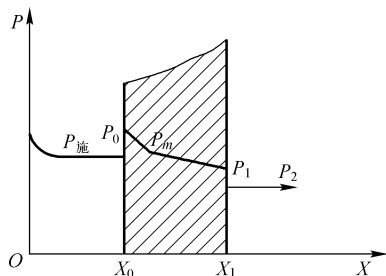


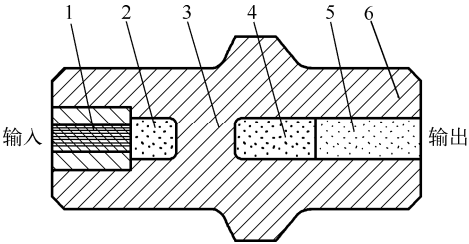
图 3-11 隔板传爆过程中的压力变化

施主装药爆压为 $P_{\text{施}}$ ，冲击波在施主装药和隔板分界面 X_0 上的压力为 P_0 ，由于隔板的冲击阻抗大于施主装药的冲击阻抗，所以 $P_0 > P_1$ ；冲击波通过隔板时受

到衰减，到达隔板与受主装药界面 X_1 时下降为 P_1 ；最后以 P_2 压力传入受主装药。受主装药能否被引爆，取决于 X_1 界面的冲击波大小。隔板越厚，对冲击波的衰减越大，受主装药越不容易被引爆；反之，隔板越薄，对冲击波的衰减越小，受主装药越容易被引爆。为保证隔板点火器良好的密封性能，应将施主装药、隔板、受主装药进行综合考虑，实现传爆与隔离的有机统一。

3.1.3.2 导弹用隔板点火器

隔板点火器用来点燃导弹固体发动机，主要由五部分组成：壳体、起爆器、施主装药、隔板、受主装药，如图 3-12 所示。



1—起爆器；2—施主装药；3—隔板；4—受主装药；5—输出装药；6—壳体。

图 3-12 隔板点火器简图

隔板是外壳的一部分，点火器引燃施主装药，施主装药产生的冲击波通过隔板引燃或引爆受主装药，受主装药再引燃输出装药。这个过程中隔板并不受破坏。

这是一种非电点火器，对静电、射频不敏感，安全性好，并且具有密封点火过程的特点，所以在一些发动机上得到了应用，但是加工工艺性差。

3.2 起爆类火工品

3.2.1 雷管

雷管是在管壳内装有起爆药和猛炸药的火工品。在《火工品术语》中，雷管被定义为“传爆系列的一个元件，可由非爆炸冲能或火帽等输出的冲能激发，并能可靠地引爆其后面的猛炸药装药，使其发生爆轰”。雷管是组成引信传爆系列的主要元件，它将一个较小的初始激发能（机械能、热能、光、电等）转化为爆轰输出，从而引爆下一级完全由猛炸药装填的爆炸元件（如导爆药、传爆药等）。雷管是火工品中用途最广、使用最多的一种元件，它与火帽的最本质的区别在于输出能量的形式不同。火帽输出的能量是以火焰为主，而雷管输出的能量是以爆轰波为主。也就是说，雷管能在较小外界能量激发下输出爆轰波，以引爆下一级火工品或猛炸药，所以雷管属于引爆类火工品。

3.2.1.1 雷管的战术技术要求

1. 合适的感度

当雷管受到一定的火焰、针刺、电能的作用时，应确实发火。例如，在验收火焰雷管时，用标准黑药柱在规定距离（ $150\pm 2\text{mm}$ ）发出的火焰能被引爆；针刺雷管要求在小于 0.049J 的针刺冲能作用下被引爆。针刺雷管比火焰雷管感度要高，这是因为针刺雷管在导弹引信中有广泛应用，导弹弹道末段速度降低较多，因此要求雷管的感度高，用较小的激发能就能引爆。火花式电雷管在 $195\mu\text{F}$ 电容、电压 4000V 下，能百分之百发火。为保证不同初始激发能下完全起爆，各种雷管的输入端采用对不同形式激发能敏感度不同的药剂，如对火焰敏感的起爆药、对针刺敏感的针刺药等。为了保证安全，感度不能过高。

2. 足够的起爆能力

为了保证被引爆的导爆药、传爆药迅速达到稳定爆轰，雷管输出端的装药都是猛炸药，如太安、黑索金、特屈儿等。目前验收的方法是用雷管炸穿直径为 $30\sim 40\text{mm}$ 、厚度为 $4\sim 5\text{mm}$ 的铅板，其铅板被炸穿的孔径要比雷管直径大，则认为是合格产品；反之认为起爆力不足。但是起爆能力过大也不好，过大可能会给引信保险机构设计增加困难。

3. 良好的长期储存安定性

即长期存放不改变其性质。它主要是靠药剂的化学安定性和各成分之间及药剂与管壳材料之间的相容性来保证。

4. 保证运输和使用的安全性

为了保证雷管在运输和使用时的安全，对雷管须做振动试验，一般要求在振动仪上振动，频率每分钟 60 次，落高 15cm ，时间 2h 。

3.2.1.2 雷管的结构

导弹引信上使用的雷管主要有火焰雷管（输入能形式为火焰）、针刺雷管（输入能形式为针刺）、电雷管（输入能形式为电能）三大类。各种雷管在主体构造上大同小异，一般由雷管壳、加强帽和药剂（起爆药和猛炸药）三部分组成。主要区别在于加强帽结构与起爆药不同。雷管结构示意图如图 3-13 所示。

1. 雷管壳

雷管壳的作用是把雷管各部分结合成一个整体，把起爆药和猛炸药保护起来，不受空气湿度及杂质的影响的作用，并起着屏蔽作用，以免受外界能量的直接作用，便于安全生产、运输和使用。它不得和炸药发生化学作用，以使雷管能长期储存。雷管壳应具有足够的坚固性，能够耐受炸药由燃烧转爆轰时的气体压力，管壳使炸药爆轰成长迅速，爆速有一定的提高，否则雷管壳过早破裂使爆炸气体漏出，延长了爆轰成长期，甚至导致雷管不完全爆炸（半爆）。在爆炸时，由外壳形成的高速破片有助于起爆其他炸药。此外，雷管壳应能承受发射时的振动，

否则会因其变形或破裂而引起导弹引信的早炸。

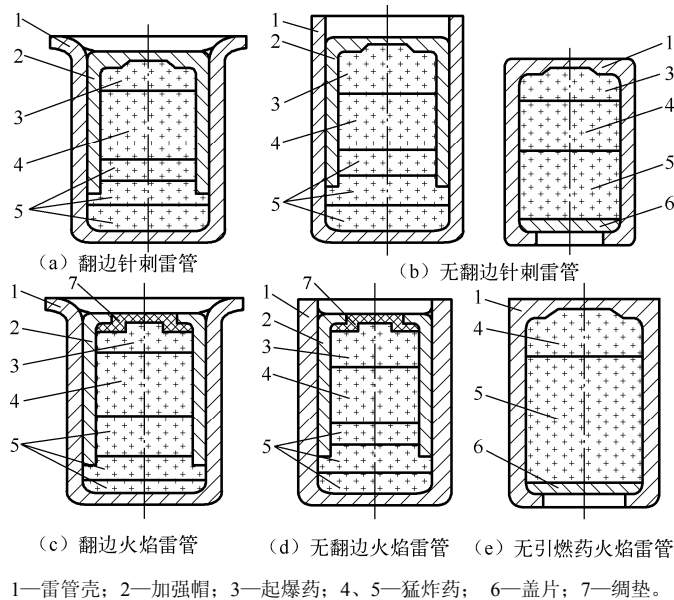


图 3-13 雷管结构示意图

事实证明，管壳强度大，起爆药的极限药量变小，即少装一些起爆药也能达到同样的爆炸效果。国家标准规定：铜管壳、铁管壳壁厚不应小于 0.2mm；纸管壳壁厚不应小于 0.9mm。

雷管壳的材料，目前一般采用镍铜合金、镁铝合金。镍铜合金（Ni 20.5%~21.5%，Cu 78.5%~79.5%）强度大，延展性比紫铜差些，但仍可以用冲压方法加工。镍铜合金对黑索金、太安、特屈儿等炸药几乎完全不作用，在空气中也几乎不变化。因为它与氮化铅在一定条件下有较慢的作用（氮化铅与其中的铜作用），所以雷管的加强帽不用镍铜合金，而是采用铝制成，以使氮化铅与管壳隔开。管壳材料的选择应考虑与药剂的相容性，如氮化铅不能直接装填于铜和黄铜管壳；梯恩梯不能直接装填于铝、铁、铅管壳中，否则会成更加敏感的易燃易爆物质，给保管和运输、使用等方面造成困难；雷汞不能直接装填于镁、铝管壳中，因为易发生反应；特屈儿不能直接装填于钢管壳中，因为它对钢有严重的腐蚀性。

2. 加强帽

针刺雷管、火焰雷管均有加强帽。加强帽是插入雷管壳内，紧紧扣在起爆药的金属或其他材料的小帽上。其一端有底，有底的一端根据雷管的类别又分有孔和无孔之别，有孔的用于火焰起爆，无孔的适合于针刺起爆。加强帽平时起防止药剂洒出并将起爆药和管壳隔开的作用，药剂爆炸时起防止爆炸气体在传爆时间向后飞散的作用。较长的加强帽有利于爆轰的传递，而且耐振性好，加强帽一般由铝材冲压而成。

针刺雷管加强帽底部无孔，但底部中心的厚度压得比其他部分要薄，以便击

针刺入，有利于提高感度。加强帽的外径与雷管的内径的配合必须是紧密的，但也不能过紧，否则装配时对安全不利，也容易损伤管壳。

火焰雷管的加强帽中心有孔，便于火焰冲能穿过，为防止药剂从中心孔漏出，孔下面加一绸垫。其孔径一般为雷管内径的 $1/3 \sim 1/2$ ，孔太小，对点火不利，甚至可能造成雷管瞎火；孔过大，会因起爆药开始作用时成为漏气的条件，从而造成起爆药能量损失，对雷管的完全起爆不利。

加强帽的作用主要是加快起爆药的爆轰成长速度。加强帽使雷管装药的爆轰波向下传递，阻止起爆药刚刚点火时气体泄漏，以加速压力的增长，使起爆药快速由燃烧转为爆轰，这对爆轰成长期长的起爆药（如雷汞）具有降低极限装药量的作用。加强帽强度越大，越有利于爆轰成长，起爆药的极限装药量就越低。加强帽的强度取决于所用材料，通常所用的材料有铁、铜、铝、塑料等，其选用的原则与管壳的要求一致。在一定的范围内，加强帽的长度增加，起爆药的起爆能力也增加，但由于起爆药达到最大爆速都有一个装药高度，若加强帽长度超过这个高度就没有明显的作用了。

3. 药剂

雷管的性能主要是由雷管的装药（起爆药和猛炸药）决定的，装药是雷管的核心部分。雷管装药一般分两部分，第一部分是第一装药（也称原发装药），第二部分是第二装药（又称次发装药）。

1) 第一装药

第一装药就是起爆药（包括单体起爆药和混合起爆药），起爆药是对外界输入能量很敏感的炸药，它在外界初始冲能的作用下很容易发火，并立即由燃烧转变为爆轰。爆轰所产生的高温、高压、高速气流对第二装药实施强有力的局部冲击而引爆第二装药（猛炸药）。第一装药又分两层，最上层是敏感起爆药，针刺雷管用针刺感度高的针刺药，火焰雷管用热感度高的三硝基间苯二酚铅；第二层是爆轰成长快、起爆能力大的起爆药氮化铅。

对起爆药的要求应有适当的感度和一定的起爆能力。适当的感度可保证雷管起爆的准确性和使用安全性。起爆药的起爆能力可用极限装药量来表示，所谓极限装药量就是使某种炸药完全爆轰的最小起爆药量。对同一种起爆药来说，极限药量小，说明该种起爆药起爆能力强，只有起爆能力强才能使猛炸药完全爆轰而增强雷管威力。

针刺雷管中第一装药用混合针刺药和糊精氮化铅，或结晶氮化铅和四氮烯混合物。混合针刺药含硝酸钡 20%、硫化锑 25%、四氮烯 5%、三硝基间苯二酚铅 45.5%~54%。它的作用主要是提高针刺敏感度。糊精氮化铅是所有起爆药（单体）中爆轰成长期最短、起爆力最大的品种，它与针刺药组合成较为理想的起爆条件。同样在混合物中以针刺敏感度很好的四氮烯与结晶氮化铅互为补充而组合成比较理想的起爆条件。

在火焰雷管生产中，军用火焰雷管则多用沥青三硝基间苯二酚铅和氮化铅，前者的火焰感度在起爆药中居首位，但没有单独起爆的能力，它与氮化铅组合后能形成良好的装药。

2) 第二装药

第二装药也就是猛炸药，也称加强药，其作用是扩大起爆药的作用，也就是将起爆药的爆轰加以传递和扩大，所以又称为传爆药，其本质作用是扩大雷管的输出能量，确保雷管有足够的威力输出。对第二装药的基本要求是：一方面对起爆药应有一定的感度，另一方面，对由它引发的被发炸药或装药（如引信的传爆药柱等）要有足够的起爆力。猛炸药被起爆药起爆的感度必须足够，否则会出现半爆现象。为了提高第二装药的感度和起爆力，在装猛炸药时应分两次进行，在雷管底部的首次装填其压力较大，使其具有较大的密度以利于爆速的提高；与起爆药接触的二次装填则多为松装，以利于提高被起爆感度而使整个雷管装药能顺利地爆轰。雷管对被发炸药的起爆力主要由猛炸药决定，猛炸药的爆速越高，则猛度越大，相应的起爆力也就越高。第二装药通常采用爆轰感度较高、临界直径较小的太安、黑索金或特屈儿等猛炸药。

由上可见，三层药的作用各不相同，第一装药的第一层药决定雷管的感度；第一装药的第二层药保证爆轰的成长和传递；第二装药决定雷管的起爆能力。引信雷管的装药量一般不超过 0.5g。

从装药情况看，雷管作用过程实际上是一个传爆系列：上层药接受外界激发能后转为爆燃并传给中层氮化铅，氮化铅再将其转为爆轰并传给猛炸药，猛炸药输出爆轰能。

3) 起爆药的药量选择

起爆药的药量选择主要依据起爆药的起爆能力和猛炸药的感度，其次是外界因素的影响。火雷管的起爆药量见表 3-1。

表 3-1 火雷管的起爆药量

品 种	正起爆药/g		品 种	副起爆药/g	
	二硝基重氮酚	氮化铅		黑索金	太安
6#雷管	0.30±0.02	0.10±0.02	6 号雷管	0.42±0.02	0.50±0.02
8#雷管	0.30±0.02	0.10±0.02	8 号雷管	(0.70~0.72) ±0.02	(0.70~0.72) ±0.02
注：1. 正、副起爆药中，各只用其中一种； 2. 起爆药量同样适用于相应的电雷管					

起爆药是以冲击波速度和冲量作用于第二装药（猛炸药）的。冲击波的速度是指波的传播速度，冲击波的冲量是指大于临界爆速的冲击波压缩猛炸药而达到爆轰时需要的能量。要具备上述条件，起爆药要能够尽快达到爆轰，即起爆药的

爆轰成长期不可太长。在常用的几种起爆药中，氮化铅的成长期最短，其次是雷汞，再次为二硝基重氮酚和三硝基间苯二酚铅。成长期越短，极限药量越小，起爆药的装药量就越少。对成长期较长的起爆药需要较长的药柱（较多的药量）或较强的外界约束。

起爆药对不同的感度（临界爆速大小不同）的猛炸药，极限药量也不同，所以，当用一种起爆药起爆不同的猛炸药时，装药量也不可能相同。实际装药量，一般取某种炸药极限装药量的 1.25~1.30 倍，在军品中还要更高些。

影响极限起爆药量的因素还有起爆药的压药密度、起爆药与猛炸药的结合方式、管壳强度、加强帽强度、长度、传火孔径等。起爆药的压药密度增大，爆轰成长期增加，不同的起爆药所受的影响不同，密度大，就会增加装药量，但密度过小，对安全不利。起爆药的纯度，特别是掺有钝感剂（虫胶、糊精等）时，也妨碍爆轰成长，因而也增加了极限装药量。增加起爆药和猛炸药的接触面积，可以减少装药量。

4) 猛炸药的药量选择

雷管的起爆能力，主要决定于猛炸药的性质和装药量，其作用是扩大起爆药，即将起爆药的爆轰加以传递和扩大，进一步扩大雷管输出的能量，确保雷管有足够的威力。

雷管中的猛炸药是因接收了起爆药的能量（爆轰或热能）后，迅速转化为更大的爆轰能输出，所以选定好猛炸药后，在考虑装药量时应充分考虑所装猛炸药的药量是否能够引爆下一级火工品。

3.2.1.3 雷管感度主要影响因素

1. 影响火焰雷管感度的因素

引信中火焰雷管是靠火帽发出的火焰点燃的。雷管感度的大小主要取决于雷管的第一装药的性质。

1) 种类

第一层起爆药种类不同，雷管火焰感度也不同。各种起爆药的火焰感度次序为：三硝基间苯二酚铅>雷汞>二硝基重氮酚>四氮烯>氮化铅。引信用火焰雷管第一层装药为三硝基间苯二酚铅。

2) 粒度

起爆药粒度越小，比表面积越大，火焰点火时接触面积越大，因此点火容易，所以在火焰雷管中用细粒的三硝基间苯二酚铅。

3) 密度

起爆药的密度越大，药压得越密实，接受火焰的面积则越小，火焰点火时感度就低；反之则感度高。但装药不能压得太松，密度太小，疏松的装药耐振性就差，不安全。一般第一装药采用 500bar（巴）压力压药。

4) 附加物

在起爆药中加入附加物多是为了安全和装药方便,所以它们是起钝感作用的。为了保证感度,其含量要严格控制在 3% 以下。

5) 传火孔

加强帽传火孔的大小对火焰感度影响很大,孔径增大,火焰感度增大,但孔径过大对爆轰成长、防潮等都不利。如果传火孔太小,可能造成雷管瞎火。现在加强帽的传火孔直径约为 2.5mm。

2. 影响针刺雷管感度的因素

针刺雷管的感度主要受击针、针刺药及加强帽的影响。

1) 击针

针刺雷管的感度受击针的角度、硬度和针尖形状的影响。在一定范围内,击针的角度越小,感度越大,击针头部采用棱锥形会使感度提高。击针的硬度越大,感度越高。

2) 针刺药

起爆药的针刺感度度和撞击感度顺序是一致的,即四氮烯>雷汞>氯化铅>三硝基间苯二酚铅。我国针刺药由 4 种成分组成:四氮烯 5%、三硝基间苯二酚铅 50%、三硫化二锑 25%、硝酸钡 20%。它们的作用分别是,四氮烯感度最高,接受针刺后首先发火,接着点燃三硝基间苯二酚铅,然后引燃 Sb_2S_3 和 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 。

装药的密度越大,针刺感度越高,这是因为密度大时受击针刺击能量集中。

3) 加强帽

加强帽的厚度增加,使雷管的感度降低,而厚度减小时,感度增加。因为加强帽厚时,击针能量一部分消耗在加强帽的变形上,加强帽越厚,消耗能量越大,感度越低,所以加强帽都做得薄一些。

3.2.1.4 雷管起爆能力

雷管引爆猛炸药,是靠其爆炸产物、冲击波及雷管破片的作用。

冲击波对被起爆装药的作用,由压力的大小和作用时间决定。

破片是雷管爆炸后壳体形成的,其中底部形成的碎片能量最大。破片离开雷管底部一定距离时速度达到最大,破片动量达到最大。

影响雷管起爆能力的因素比较多,主要有装药、管壳和加强帽等。

1. 装药

装药的性质、密度和粒度等直接影响起爆力,如起爆药氯化铅的起爆力随密度增大而增大。雷管装药量对起爆力影响很大,药量越多,起爆力越大,但由于体积的限制,雷管装药不能过多,所以第二装药多用太安、黑索金等猛度大的炸药。第二装药的药量是根据雷管中猛炸药达到稳定爆轰并产生最大威力的要求确定的。

2. 管壳

增大雷管壳材料的强度，对起爆药和猛炸药的爆速增长有利，可使雷管的起爆能力增大。若药量不变、管壳底部厚度不变，增加管壳壁厚，能增加雷管轴向起爆能力。

3. 加强帽

加强帽的长度、厚度对雷管能力也有影响。在一定范围内改变加强帽的长度，雷管的起爆能力随加强帽的增长而增大。如果加强帽和雷管之间配合不好，装配不牢固则使雷管起爆能力下降。

3.2.1.5 火雷管

火雷管在导弹引信中有着广泛的应用，主要装配在以火帽为首的发火工品的传爆序列中。装有火雷管的引信传爆序列结构如图 3-14 所示。

1. 火雷管的类型

常用的火焰雷管大致可分为三类：

1) LH-8、LH-7、LH-11

特点是装药量多，起爆能力较大，可直接起爆 23~30mm 装药。其中 LH-8 雷管是所有火焰雷管威力最大的一种，能可靠地直接起爆 30mm 主装药。LH-11 雷管装药量和 LH-8 雷管一样，而且它的管壳较厚，刚度和强度均较好。跟加强帽配合紧，抗冲击性能好，可以经受发射及着目标时的巨大冲击。但是因为管壳厚，实际装药直径减小，轴向起爆能力相对较小。LH-7 雷管威力稍小。

2) LH-3、LH-2、LH-10

其中 LH-3 雷管装药量、外形尺寸都比较适用，又因为它的管壳带翻边，所以，在用于非保险型及半保险型引信时雷管直接装在传爆药柱的雷管孔内，用翻边定位并压紧。LH-2 雷管和 LH-3 相比除了没有翻边及高度低 0.2mm 外，其余都一样，它多用于保险型引信中，雷管装在雷管座的孔内，用点铆加以固定。LH-10 雷管与 LH-3 结构类似，只是身管高，装猛炸药多一些，侧向起爆能力大一些。将它用于保险型及半保险型引信，可提高其起爆能力。

3) LH-5、LH-1、LH-6

LH-5、LH-1 两种雷管直径小，可用于结构尺寸要求较严格的保险型引信中，且它们的管壳是铝镁合金，壳壁较厚，所以它的强度和耐冲击性能均好。LH-6 雷管特点是高度较高，装药量少，压药力大，空位也大。利用这空位装延期体及 LZ-1 火帽，可装配成有延期作用的针刺发火的雷管组件。

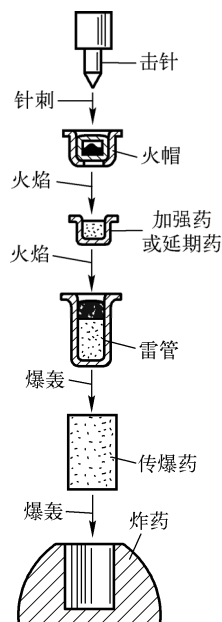
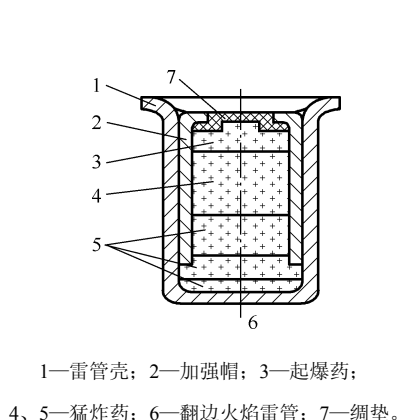


图 3-14 引信传爆系列结构图

2. 火雷管的结构

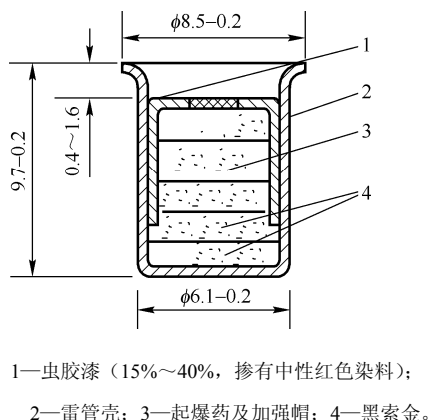
火雷管通常由雷管壳、加强帽、第一装药（斯蒂芬酸铅、叠氮化铅）、第二装药（猛炸药）及绸垫等部分组成，基本结构如图 3-15 所示。

LH-3、LH-8 火焰雷管结构见图 3-16、图 3-17。



1—雷管壳；2—加强帽；3—起爆药；
4、5—猛炸药；6—翻边火焰雷管；7—绸垫。

图 3-15 火雷管基本结构示意图



1—虫胶漆（15%~40%，掺有中性红色染料）；
2—雷管壳；3—起爆药及加强帽；4—黑索金。

图 3-16 LH-3 结构示意图

1) LH-3 火雷管

第一层装药（沥青斯蒂芬酸铅）： $0.06 \pm 0.02\text{g}$ ；

起爆药（糊精氮化铅）： $0.20 \pm 0.02\text{g}$ ；

黑索金： $0.12 \pm 0.03\text{g}$ 。

注意：允许黑索金用虫胶造粒后使用，其中虫胶含量不许超过 3%。

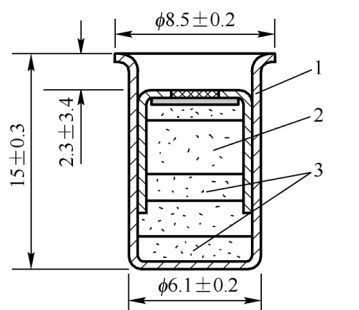
2) LH-8 火雷管

第一层装药（沥青斯蒂芬酸铅）： $0.06 \pm 0.02\text{g}$ ；

起爆药（糊精氮化铅）： $0.20 \pm 0.02\text{g}$ ；

黑索金： $0.23 \pm 0.05\text{g}$ 。

注意：允许黑索金用 35%酒精虫胶造粒后使用，其中虫胶含量不许超过 3%。



1—雷管壳；2—起爆药及加强帽；3—黑索金。

图 3-17 LH-8 结构示意图

3.2.1.6 针刺雷管

针刺雷管主要应用于导弹触发引信发火机构中。触发引信是靠接触目标来感知目标的，即导弹与目标直接碰撞。由于碰击，导弹受到目标的反作用力而减速，因而引起了引信运动状态的变化，从而使引信发火。

引信的发火机构是由激励装置和传爆系列的第一个火工品元件组成，其作用是将由外界获得的或机构本身的某种能量转换成第一个火工元件的输出。发火机

构是引信不可缺少的组成部分。

图 3-18 所示为导弹引信弹簧针刺发火机构。弹簧针刺发火机构工作时，压缩弹簧可以推动击针，也可推动雷管座完成发火作用。

1. 针刺雷管的类型

引信中常用的针刺雷管有 LZ-1、LZ-4、LZ-7、LZ-8 等几个型号。其中除 LZ-8 针刺感度较低(落锤 100g 落高 21cm)外，其他雷管的感度均为上限(落锤 52g) 8cm，下限 0.5cm。

1) LZ-1

LZ-1 雷管是轴向起爆力较大的雷管，形状短粗，适用于尺寸要求不太严格、导爆药直径比较粗大的保险型引信中。

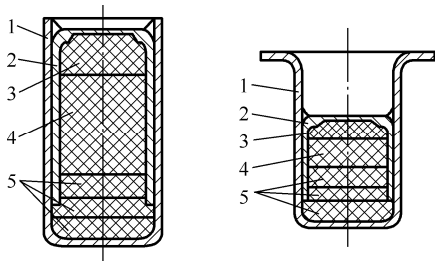
LZ-1 雷管直径稍大于 LZ-4 雷管，但装药量比它多一倍，装药高度是它的两倍多，这样大大增加了侧向起爆能力，将雷管伸入传爆药柱内，充分利用其侧向起爆力。

2) LZ-8

LZ-8 雷管是上述几种针刺雷管中威力最大的，装太安 0.45g。

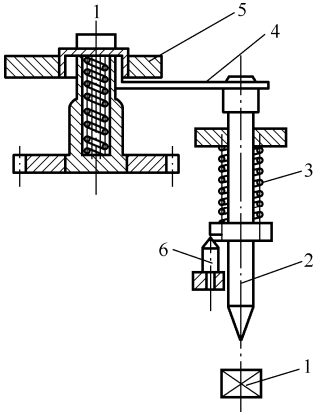
2. 针刺雷管的结构

针刺雷管通常由雷管壳、加强帽、针刺药、起爆药、猛炸药等部分组成，基本结构如图 3-19 所示。



1—雷管壳；2—加强帽；3—针刺药；4—起爆药；5—猛炸药。

图 3-19 针刺雷管基本结构示意图



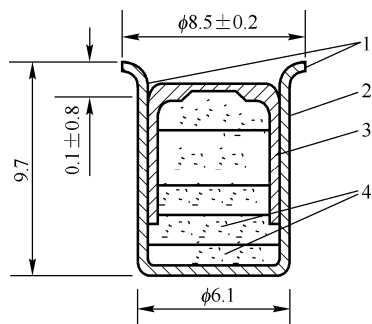
1—针刺雷管；2—击针；3—压缩弹簧；
4—解脱钩；5—转针；6—支座。

图 3-18 导弹引信弹簧针刺发火机构图

LZ-3、LZ-7 针刺雷管结构见图 3-20、图 3-21。

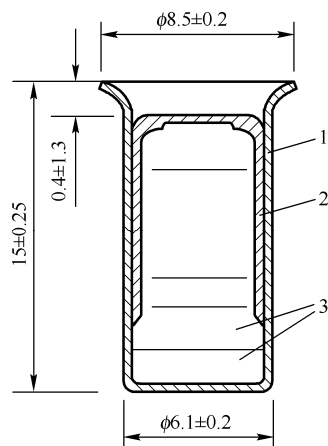
1) LZ-3 针刺雷管

针刺药：0.06±0.01g；



1—涂漆；2—雷管壳；3—起爆药及加强帽；4—黑索金。

图 3-20 LZ-3 结构示意图



1—雷管壳；2—起爆药及加强帽；3—黑索金。

图 3-21 LZ-7 结构示意图

起爆药（糊精氮化铅）： $0.20 \pm 0.02\text{g}$ ；

黑索金： $0.12 \pm 0.03\text{g}$ 。

2) LZ-7 针刺雷管

针刺药： $0.06 \pm 0.01\text{g}$ ；

起爆药（糊精氮化铅）： $0.21 \pm 0.02\text{g}$ ；

黑索金： $0.27 \pm 0.04\text{g}$ 。

3.2.1.7 电雷管

电雷管是利用电能起爆的雷管，它是近炸引信或电引信中传爆系列的首发元件。装有电雷管的引信执行级电路结构如图 3-22 所示。当引信启动信号 V_{IN} 发送到执行级电路时，执行级开关电路工作，3 点与 4 点电路接通，储能电容 C_2 经 3、4 点对电雷管放电，电雷管引爆。

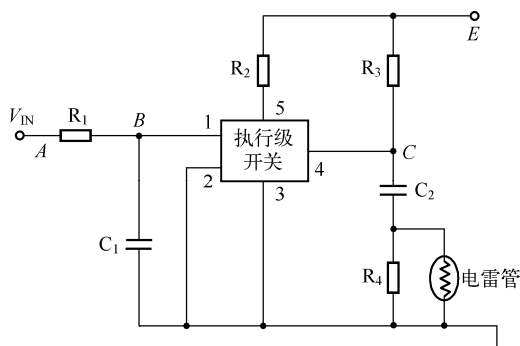


图 3-22 装有电雷管的引信执行级电路结构图

1. 电雷管的特点

- (1) 作用迅速、准确，一般可以做到几微秒爆炸。
- (2) 作用时间散布小，可以大量同时起爆。如有的导弹用电雷管，十几发同时起爆，时间偏差不过 $1\mu\text{s}$ ，表现了爆炸的时间一致性好，即爆炸同步性好。
- (3) 所需初始激发能小，一般只要 $10^{-5}\sim 10^{-3}\text{J}$ 即可，而在机械引信中，火帽发火则需约 0.1J 的针刺能量；针刺雷管发火所需针刺能为 $0.04\sim 0.08\text{J}$ 。
- (4) 可以利用多种形式电能。如电池、压电晶体、无线电中的 RC 放电。
- (5) 使用方便，能够适应多种用途。

2. 电雷管的分类

电雷管种类很多，导弹引信用电雷管按其电能作用形式可分为以下几类：

1) 灼热桥丝式电雷管

电极间焊上电阻丝，电流通过时电阻丝加热，点燃周围的药剂而引爆。其特点是工作电压低。

2) 火花式电雷管

它是在两极之间离开一定间隙，加上高电压，利用放电火花引爆。其特点是工作电压高。

3) 中间式电雷管

两极间充以导电物，其发火电压介于上述二者之间。其特点是发火冲能小，感度高。

4) 爆炸线（膜）式电雷管

两极间连一细金属丝（或金属膜），当强大电流通过时，金属丝（或金属膜）以极快的速度熔化气化，生成具有高温高压的等离子体，向周围的介质迅速膨胀，引起炸药的爆炸。它的特点是抗射频和抗静电能力强。

3. 引信对电雷管的战术技术要求

无论是近炸引信还是电引信，其对传爆序列中的电雷管性能要求是一致的，即使用安全，作用可靠，具有足够的起爆能力。除此之外，对电雷管还要求满足以下要求：

1) 具有适当的感度

根据不同的使用要求，起爆机理不同的电雷管有不同的感度范围。如 LD-1 电雷管，当放电电容 156pF 时，发火电压为 $2000\sim 3000\text{V}$ ，安全电压 800V ，LD-3 电雷管（导电药式）；当放电电容为 1500pF 时，发火电压为 500V ，安全电压为 70V 。

2) 瞬发性好、同步性好

对付某些目标时要求电雷管的作用时间越短越好。如装有串联战斗部的导弹引信用电雷管，作用时间应为几微秒。在装有定向战斗部的导弹引信中，一次爆炸需同时启动多个电雷管，不仅要求电雷管的瞬发度，还要求爆炸的时间一致性

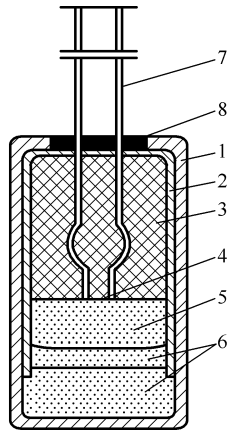
好，即爆炸同步性好。

3) 具有足够的抗干扰能力

由于电雷管不可避免地受到雷电、静电及射频电磁场的干扰，因此要求电雷管抗外界电干扰能力越大越好。

4. 桥丝式电雷管

桥丝式电雷管的起爆原理是，两极之间的桥丝在电流通过时产生热量，加热桥丝周围的起爆药，使之发火，爆轰在雷管中传播。它们的主要优点是，抗静电能力较强，安全性较好，性能参数比较稳定。采用不同的桥丝材料，调整桥丝直径和选择不同药剂，可以适应不同的战术技术要求，所以桥丝式雷管应用得很广泛。



1—雷管壳；2—加强帽；3—电极塞；
4—桥丝；5—起爆药；6—猛炸药；
7—脚线；8—绝缘套管。

图 3-23 桥丝式电雷管

1) 桥丝式电雷管的结构

桥丝式电雷管的典型结构如图 3-23 所示。电雷管由雷管壳、加强帽、起爆药、猛炸药、电极塞、绝缘套管、脚线和桥丝构成。雷管壳材料用镍铜，加强帽材料用铝，脚线为铜线，电极塞用黑酚醛塑料，起爆药是氮化铅，猛炸药是太安。

2) 丝桥式电雷管的性能参数

桥丝式电雷管起爆的条件取决于电流的大小和通电持续时间。由于桥丝式电雷管的电阻很小（几欧姆到几十欧姆），所以用较低电压就可得到所需的起爆电流，其感度一般用最小发火电流或最小发火能量表示。

(1) 最小发火电流。即桥式电雷管通电后百分之百发火所需的最小电流，这是电雷管感度的上限。根据产品不同，最小发火电流可从 0.5A 到几安。

(2) 最大安全电流。即桥丝式电雷管通电时百分之百不发火的最大电流，这是电雷管感度的下限。这个值可以保证电雷管在受到一些杂散感应电流时的安全。最大安全电流根据使用要求不同可为几毫安到 1A。

(3) 最小发火能量。许多雷管用电容起爆，最小发火电流不能表明其感度，这时就要用起爆电雷管的最小能量 $W = \frac{1}{2} CV^2$ 来表示。桥丝式电雷管的最小发火能量可以由 $10^{-5}J$ 到 1J。

(4) 作用时间。雷管从通入电流引爆到爆炸完成所需的时间，称为作用时间。军用桥丝式电雷作用时间一般在微秒级。

3) 桥丝式电雷管性能主要影响因素

雷管的性能主要表现在感度、爆轰成长速度及威力三方面。桥丝式电雷管的

爆轰成长及威力和其他雷管相似，在此只讨论影响桥式电雷管感度及作用时间的因素。

(1) 桥丝直径的影响。

理论分析可知，在其他条件不变时，桥丝温度的高低与桥丝直径的平方成反比，即桥丝直径越大，桥温越低，也即发火所需能量越大或电压越高。所以为了使桥丝式电雷管的感度高、作用时间短，就要选用较细的桥丝，但是选择桥丝时还要考虑到发射时的耐振性，所以也不能选得过细。目前一般采用 $\phi 0.009\text{mm}$ 。桥丝直径与发火感度的关系如表 3-2 所示。

表 3-2 桥丝直径与发火感度的关系

桥丝直径 / μm	发火电容 / μF	起爆药	电压发火 感度 U_{50}/V	偏差 σ / V
9.5	22	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	4.75	0.35
10.2	22	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	5.12	0.31
11.2	22	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	5.20	0.74
13.8	22	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	7.02	0.82

(2) 桥丝长度的影响。

在其他条件不变的情况下，桥温与桥长成反比，桥长增大要求发火能量增加。桥丝长度与发火感度的关系如表 3-3 所示。

表 3-3 桥丝长度与发火感度的关系

桥丝长度 / mm	试验数量 /发	电容 / μF	电压 / V	能量 / J
0.35~0.45	21	3500	365	2.3×10^{-4}
0.55~0.65	19	3500	400	2.8×10^{-4}

(3) 桥丝材料的影响。

基于桥丝火工品点火方程可知，桥丝温度与材料的密度和比热容的乘积成反比。桥丝材料与发火感度的关系如表 3-4 所示。

表 3-4 桥丝材料与发火感度的关系

桥丝材料成分 /%	试验数量 /发	电容 / μF	电压 / V	发火数 /%
Ni/Cr 80/20	60	3000	450	95
Ni/Cr 90/10	47	3000	450	50

试验表明，含镍量高的桥丝其发火率低。这是因为 Ni 的比热容为 0.052，Cr 的比热容为 0.230，Ni 的密度为 $8.9\text{g}/\text{cm}^3$ ，Cr 的密度为 $7.1\text{g}/\text{cm}^3$ 。所以 Ni/Cr 90/10

的桥丝的密度和比热容乘积要大于 Ni/Cr 80/20 的乘积，因此，Ni/Cr 90/10 桥丝要求具有较高的发火能量，故发火率低。

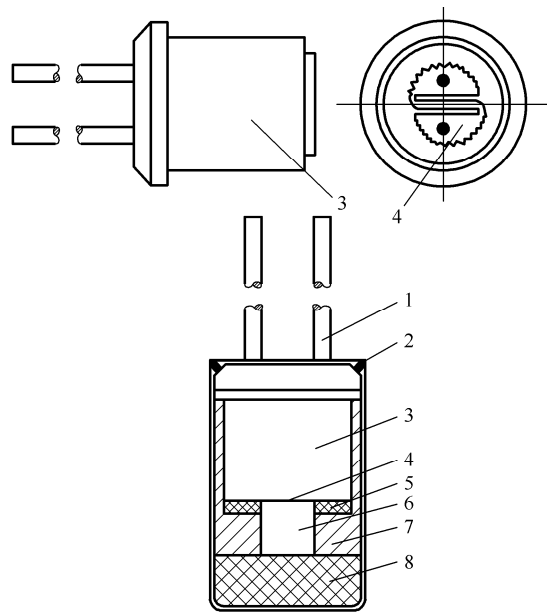
（4）起爆药的影响。

由于桥丝式电雷管属热起爆过程，所以热感度高的起爆药有利于提高产品的感度。试验结果是三硝基间苯二酚铅与氮化铅的共晶感度最高，次之是细晶氮化铅，聚乙醇氮化铅感度最低。

4) 钝感电雷管

按美国军标规定，钝感火工品是指温度为 107℃时，通电 1A、1W、300s 不发火；在-62℃时，通电 5A、5W 必须在 50ms 内可靠发火。使电火工品达到上述要求，用钝感电桥（或配合用钝感药剂）是一种常见办法，这类雷管在导弹中都得到了应用。

这里介绍的是一种带状电桥钝感电雷管，其结构如图 3-24 所示。



1—导线；2—密封胶；3—玻璃电极；4—桥带；5—绝缘垫片；6—氮化铅；7—铝套管；8—太安。

图 3-24 带状电桥钝感电雷管

电桥为厚 0.0025mm、宽 0.25mm 的镍铬合金桥带。其表面积比相同截面积的圆柱状电桥要大，单位长度电桥的消耗也就大，因而外界电场在电桥上产生的热量比较容易散失。为了构成电桥到铝套管的安全放电通道，电桥周围做成锯齿形。

带状电桥还可以做成其他的形状，图 3-25 示出了其中的几种。

桥带既能耗散射频电流又能通过其锯齿形状向周边泄放静电，因此桥带是防射频、防静电电雷管的首选换能元件。

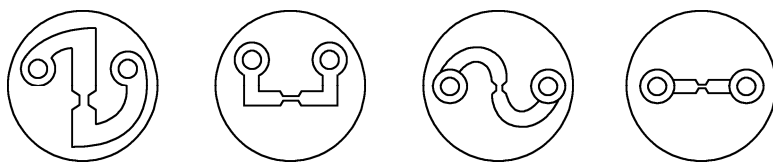


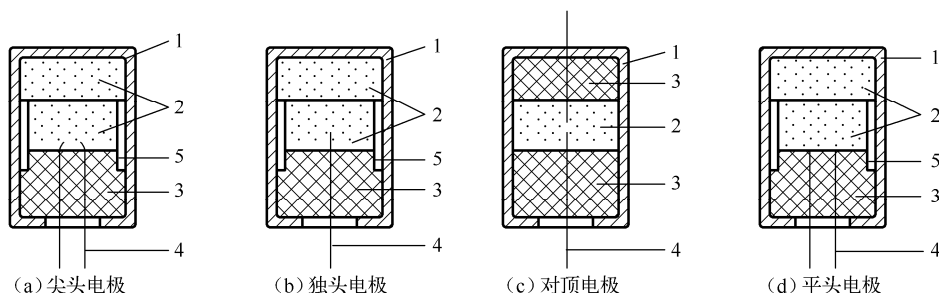
图 3-25 钝感起爆器带状电桥的形式

5. 火花式电雷管

火花式电雷管是在两个电极之间隔开一定间隙，依靠在两极加上高电压时，电击穿产生放电火花来引爆炸药。这种雷管要求电源有足够高的电压，电容则可很小，因而发火能量也较小，数量级约为 10^{-4}J 。与其他类型电雷管相比，火花式电雷管的起爆电压高，要达数千伏，起爆电容小，只有一百多皮法拉，作用时间短，可小于 $6\mu\text{s}$ 。

1) 火花式电雷管的结构

火花式电雷管的电极形式有以下几种，如图 3-26 所示。



1—雷管壳；2—药剂；3—电极塞；4—电极；5—加强环。

图 3-26 火花式电雷管的几种电极形式

以 LD-1 电雷管为例说明火花式电雷管的结构及作用。如图 3-27 所示，它是由雷管壳、电极塞、极帽、装药底帽、起爆药、猛炸药、等电位装置七部分组成。

(1) 雷管壳与装药底帽。

雷管壳与底帽的作用是固定和保护炸药（起爆药及猛炸药），它不应和炸药发生化学反应，使雷管能够长期存放，并且有足够的坚固性，能够耐受炸药由燃烧转爆轰时的气体压力。否则，雷管壳和装药底帽过早破裂使气体漏出，可能致使雷管出现半爆，另外雷管壳和底帽应能承受发射的震动。为了满足上述要求，选用的材料是铝合金。

(2) 电极塞与极帽。

电极塞（内装有铝合金的芯杆电极）和极帽配合以保证雷管的发火性能。根据各种火花式电雷管的感度要求的不同，它们的间隙可在 $0.08\sim 0.25\text{mm}$ 。LD-1 火花式电雷管的极距是 $0.15\sim 0.25\text{mm}$ 。

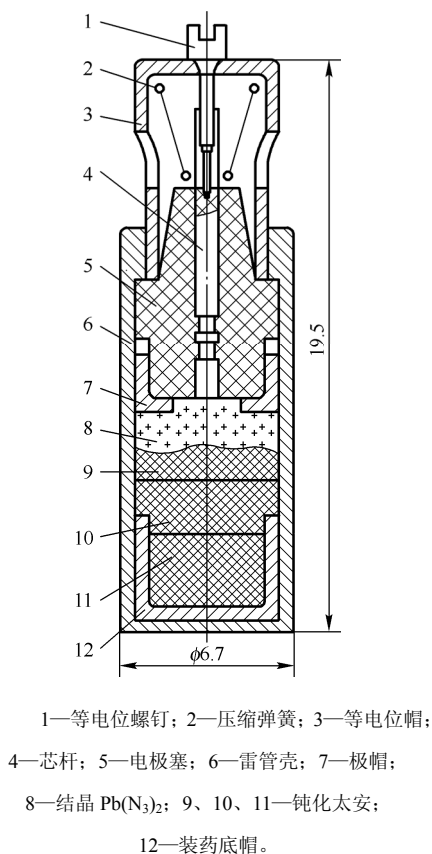


图 3-27 LD-1 电雷管

一般认为火花式电雷管发火是电击穿过程。在这里有两种看法：一种认为火花式电雷管电极两端放电属不均匀电场气体介质的击穿，即产生高温高压的电火花，引爆炸药；另一种认为火花式电雷管，在电极两端产生很大的不均匀电场。属固体介质击穿，即氮化铅的晶格被破坏，引起电雷管爆炸。

一般认为火花式电雷管发火是电击穿过程。在这里有两种看法：一种认为火花式电雷管电极两端放电属不均匀电场气体介质的击穿，即产生高温高压的电火花，引爆炸药；另一种认为火花式电雷管，在电极两端产生很大的不均匀电场。属固体介质击穿，即氮化铅的晶格被破坏，引起电雷管爆炸。

(1) 气体介质的击穿。

在气体电介质中，原来存在一些游离的离子和电子，当两极间加一定的电压时，两极间存在的少量离子和电子在电场作用下开始运动，并在运动过程中碰撞中性分子，产生了更多的离子和电子，造成了“电子崩”现象。电离的现象在两极间突然扩大，在极短时间内形成了大量的电子和离子，这些电子和离子各奔向自己相异的电极，造成两极间电阻陡然下降、电流突然增大，同时在两电极上和电极间又发生了相异电荷的中和现象，以火花放电形式放出能量，这种能量释放

(3) 起爆药与猛炸药。

起爆药和猛炸药是该产品的核心。起爆药主要是保证产品的感度。猛炸药主要是保证爆炸的威力和猛度。LD-1 起爆药为氮化铅，猛炸药为太安。

(4) 等电位装置。

等电位装置由等电位螺钉、压缩弹簧和等电位帽组成。它是为了保证安全而设置的，要求导通性良好，保证在非使用情况下两极之间不存在电位差，以提高产品抗静电的能力。由于火花式电雷管的起爆电能可在 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{J}$ ，人体所带静电（几百伏电压，几百皮法拉的电容）已足够起爆它。为了避免人体静电的作用，加上等电位装置是完全必要的。

在装配到引信上时，将等电位螺钉旋去，极帽与雷管壳配合构成了正极，与压电陶瓷正极接通，中心电极与压电陶瓷负极接通。

2) 火花式电雷管发火机理

测定火花式电雷管在两极加电压时电流和电阻的变化情况，当极间电压超过某一临界值时，介质将失去其绝缘特性，在几十纳秒时间内，电阻可从 $10^{10} \Omega$ 降至几欧姆，电流可突升至几十乃至几百安培，这样大的电流通过两极间引起火花式电弧，使雷管爆炸。

的功率是巨大的。

(2) 固体介质的击穿。

固体介质击穿有两种：电击穿和热击穿。从时间上讲热击穿是在 10^{-3}s 完成，而电击穿是在 $10^{-9}\sim 10^{-7}\text{s}$ 完成。火花式电雷管的作用时间是 $10^{-6}\sim 10^{-5}\text{s}$ ，所以认为是电击穿。

在每一介质中，除去组成介质的束缚电荷外，还有少数“自由”电荷，决定着物质的导电性。电压加上后，这些电荷开始移动，在运动中与周围束缚电荷碰撞，并使它们振动。若电场足够强大，则运动电荷在运动中能够积蓄起较大的能量，在运动中将束缚电荷从原来位置上打出，把它转变成自由状态，这个新的电荷在极短时间内增加，与自由电荷同时增长的电流将介质击穿。电击穿的作用时间大约在 10^{-7}s 内完成。如果包括炸药起爆的时间，火花式电雷管作用时间为 $10^{-6}\sim 10^{-5}\text{s}$ ，可以认为 LD-1 雷管的击穿有气体击穿，也有固体介质击穿。

在电击穿的范围内，击穿的地点通常在电极边缘处，击穿电压除与介质的厚度有关外，还与介质离子间距离、晶格能大小等因素有关。

可以把火花式电雷管的发火过程这样描述，在电场作用下，两极间首先发生气体击穿。气体击穿后成了导电物质，这时全部电压加在起爆药晶体上，如果电压高于氮化铅的击穿电压，则发生固体介质击穿，氮化铅被击穿。气体击穿后在两极间沿起爆药粒表面形成一条电流通路，电流大量通过。能量集中在通道内，产生高温高压的电火花，以冲击波形式引爆起爆药。

3) 火花式电雷管性能主要影响因素

(1) 电极距离对感度的影响。

电极距离的大小对发火电压影响很大，随电极距离的增大，发火电压随之增大。因此严格控制电极距离是非常重要的。电极距离与发火电压的关系如表 3-5 所示。

表 3-5 电极距离与发火电压的关系

电极距离 /mm	0.06~0.08	0.08~0.10	0.10~0.12	0.12~0.14	0.14~0.16
平均发火电压 /kV	1.57	1.62	1.81	1.88	2.16

(2) 起爆药种类不同对感度的影响。

起爆药结晶大，感度高，发火电压低。颗粒增大使发火电压精度变差，所以 LD-1 电雷管装的氮化铅粒度控制在 $30\sim 40\mu\text{m}$ 。

(3) 起爆药种类不同对感度的影响。

火花式电雷管发火机理比较复杂，起爆药的击穿电压不同，直接影响雷管的感度。其关系见表 3-6。

表 3-6 起爆药种类与发火电压的关系

起爆药名称	试 验 发 数	平均发火电压/kV
氮化铅	46	1.9
氮化铅与三硝基间苯二酚铅共晶	62	1.52
聚乙烯醇氮化铅	32	3.24

氮化铅与三硝基间苯二酚铅共晶感度最高，氮化铅居中，聚乙烯醇氮化铅比较钝感。大量试验表明选用氮化铅较好。

(4) 起爆药压力对感度的影响。

在一定范围内，压药压力增加，产品感度下降，但不明显，所以在生产中只要选择合适的压药力就可以。

(5) 湿度对感度的影响。

起爆药含水量对雷管感度影响较大。在一定范围内，湿度增大则感度也增大。某工厂做过这样的试验，将粉末结晶氮化铅在相对湿度 65% 工房中存放一段时间，使氮化铅的含水量为 0.04%，然后把该药压入 LD-1 雷管中，这样生产出来的产品感度较高。这充分说明了湿度对雷管感度的影响。

6. 中间式电雷管

所谓中间式，就是指这一类雷管超爆原理介于火花式和灼热桥丝式之间。中间式电雷管一般有两种：薄膜式电雷管、导电药式电雷管。

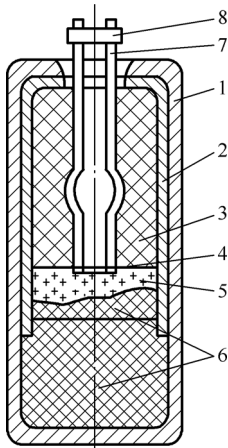
1) 薄膜式电雷管

薄膜式电雷管是一种中间式电雷管。这种雷管以具有一定导电性的薄膜作为电桥。它的特点是感度高，可在小于 10^4J 的能量下发火，作用时间短（微秒级）。常用的膜有石墨膜、金属膜及玻璃半导体膜等。以 LD-2 电雷管来说明石墨膜电雷管的原理。

(1) 石墨膜电雷管。

LD-2 电雷管结构见图 3-28。它的极距保持在 $0.04 \sim 0.08 \text{mm}$ 。在两电极之间的电极塞上涂一层由石墨与聚苯乙烯的醋酸丁酯溶液配制的悬浮液，构成导电膜，其电阻值为 $2 \sim 10 \text{k}\Omega$ 。

薄膜中各个导电的石墨颗粒连接起来可在两极之间构成许多微小的导电通路，同时各导电颗粒之间又有无数个微小间隙。这种特殊的电路结构使它的发火机理变得复杂了。电阻值低于数十欧姆时，发火过程类似于桥丝式；电阻值大于 $10^6 \Omega$



- 1—雷管壳；2—加强帽；3—电极塞；
4—石墨膜；5— $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ；6—黑索金；
7—脚线；8—绝缘套管。

图 3-28 LD-2 电雷管

时，发火过程类似于火花式；阻值在数十欧姆到 $10^6\Omega$ 之间时，发火过程与所加电压有关，即电压高于导电膜的击穿电压而发火时，主要为电击穿（一般击穿电压为 200~300V），反之，为灼热作用。

导电颗粒构成的通路十分狭窄，因此能够起到强烈局部加热的作用，同时导电颗粒之间的间隙极小，又构成了很小而灵敏的火花放电间隙。所以薄膜式电雷管是一种最灵敏的电雷管。LD-2 电雷管的发火为能量为 10^4J ，最大安全能量为 10^6J 。

以下为 LD-2 电雷管的主要性能参数。

极距：0.04~0.08mm；

电阻：2~10k Ω ；

发火电压：0.0022 μF ，300V；

安全电压：0.0022 μF ，50V；

作用时间：<25 μs 。

影响薄膜式雷管感度的主要因素有极距、悬浮液的配比、导电膜的厚度、起爆药的压力等。

薄膜式电雷管的主要缺点是抗静电及抗射频干扰能力不强，安全性较差，且目前生产的均一性不好，性能不够稳定，因此有待于进一步改造工艺提高其性能。

（2）金属膜电雷管。

金属膜电雷管是由桥丝式电雷管发展而来的。两极之间用一层金属镀膜代替桥丝，其发火机理与桥丝电雷管相同，属热起爆机理。

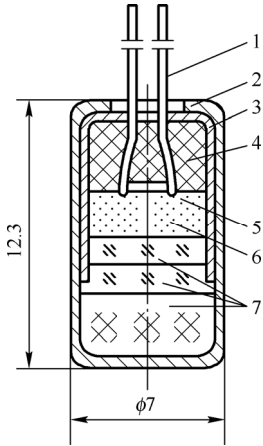
从桥丝电雷管的桥温计算知道，雷管的感度和桥丝的横截面积是成反比的，镀膜可以使横截面积减小许多且牢固，因此膜式雷管可以比桥丝式雷管有更高的感度。

金属膜比石墨膜强度高，性能比较稳定。其缺点是镀膜工艺复杂，有待于进一步研究改进。

（3）玻璃半导体膜电雷管。

玻璃半导体膜电雷管的主要性能比上述各电雷管高得多。其结构如图 3-29 所示。

玻璃半导体电雷管的发火机理是，利用玻璃半导体具有的电气开关性能，使雷管平时处于高阻态，使用时加一特征电压使其由高阻态变为低阻态。在由高阻态向低阻态转变的瞬间，出现足以使起爆药爆炸的电火花，引起雷管爆炸。这一转化过程所经历的时间极短，特别是在施加电压较高时，时间甚至短到 $1.5 \times 10^{-10}\text{s}$ 。转换电压主要由极距决定。



1—导线；2—雷管壳；3—加强帽；4—电极塞；
5—导电股点；6—氮化铅；7—太安。

图 3-29 玻璃半导体电雷管

由于玻璃半导体为无序半导体（非晶体），杂质的影响较小。极距可用光刻法精确控制，因而转化电压的散布可控制在很小的范围内，这就使这种电雷管的起爆电压和安全电压散布很小。这样，当起爆电压不变时，可大大地提高安全电压的值，对引信的可靠性和安全性特别有利。

玻璃半导体薄膜电雷管是靠电压起爆的。当起爆电容较大（如大于 780pF）时，起爆电压几乎不随电容的变化而变化。起爆电压的大小可通过改变极距来调整。试验证明这种电雷管的抗干扰性能较好。它的主要缺点是工艺复杂，成本较高。

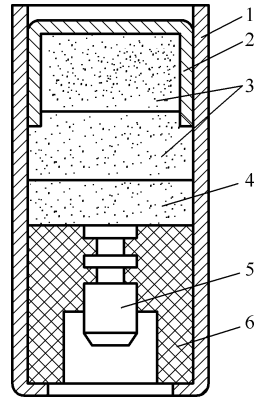
2) 导电药式电雷管

导电药式电雷管属中间式电雷管的一种。膜式电雷管虽有较高的感度，但稳定性较差，均匀性不够好。而导电药式电雷管的电性能比较稳定，其起爆时间也只有几微秒，故它可以代替薄膜式电雷管而用于压电引信。

(1) 导电药式电雷管结构。

以 LD-3 电雷管为例。该雷管是屏蔽式导电起爆药电雷管，其结构如图 3-30 所示。

导电氮化铅是在聚乙烯醇氮化铅化合过程中，加入了 3.5%~4%极细的石墨（4μm 以下），这样在氮化铅生成过程中石墨进入氮化铅的结晶中，使氮化铅成为具有比较稳定导电性能的导电药。



1—雷管壳；2—底帽；3—压装 RDX；
4—导电氮化铅；5—芯杆电极；6—电极塞。

图 3-30 LD-3 电雷管结构

自身屏蔽结构是根据避雷保护原理，采用了雷管壳体自身屏蔽的保护结构。这种结构不仅对静电场有屏蔽作用，而且在交流高压电场中仍具有较好的安全性。LD-3 雷管的这种自身屏蔽结构很好地解决了高灵敏度和安全性之间的矛盾。

导电药式电雷管的发火机理属于热点发火与电击穿发火。这是因为两极间的导电药是由聚乙烯醇氮化铅内部包覆着导电粒子——石墨，形成了不同于一般电路的特殊电路。这种电路在微观上由导电粒子连成的微小通路和导电粒子间形成的微小火花间隙构成。由于导电粒子间距很小，击穿电压大大降低，因此提高了产品的感度。

(2) 导电药式电雷管的性能参数。

以 LD-3 为例说明导电药式电雷管的性能参数。

极距：2mm；

电极间电阻：>0.1MΩ；

最小发火电压：1500pF 500V；

最大安全电压：1500pF 70V；

作用时间： $<10\mu\text{s}$ ，现一般在 $2\mu\text{s}$ 左右。

(3) 导电药式电雷管性能主要影响因素。

导电药式电雷管的感度与导电物的含量关系很大，因为其电阻是由导电粒子在非导电粒子中的分布决定的。由导电粒子组成的导电通路形成了无数条小电路交织的网络，这些网络的形状和数量都是随机的，因此不能得到严格的定量关系，只能从大量的试验中找出一般性规律。

通常在其他条件相同时，影响产品感度的主要因素有：

石墨细产品敏感，反之钝感。因为石墨细，容易进入氮化铅结晶，即进入氮化铅结晶的石墨多。

石墨加入量多产品敏感，反之钝感。因为加入量多，电阻小，导电物间距离小，易于击穿发火。但是石墨加入量过多时，就会有未进入结晶的石墨，导致运输后感度变化较大。

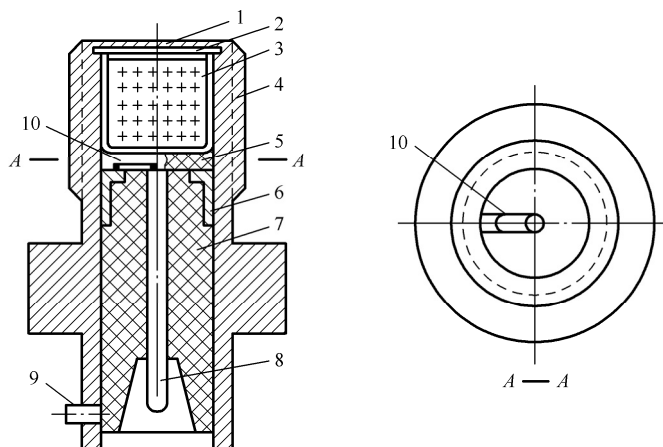
导电药结晶小敏感，反之钝感。但是结晶不宜过小，过小会使工艺上装压药有困难。

7. 爆炸线（膜）式电雷管

1) 爆炸线（膜）式电雷管

爆炸线（膜）式电雷管又称为爆炸桥丝电雷管。其发火机理是在高强度电流通过电桥时，桥丝立即熔化气化，形成高温高压的等离子体。冲击猛炸药以巨大的速度向周围猛烈膨胀，发生爆轰。这种雷管只在特定的脉冲信号下作用，而且直接起爆猛炸药，雷管不需装起爆药，使雷管的安全性大为提高。由于它具有很好的抗干扰性能，对机械冲击和热冲击性能也好，因此，它在许多现代尖端武器中被广泛采用，如美国的潘兴导弹、北极星、A-3 导弹和宇宙火箭土星等都装有爆炸桥丝电雷管。

爆炸桥丝电雷管的结构如图 3-31 所示。



1、2—盖片；3—炸药；4—壳体；5—缺口垫片；6—导电圈；7—塑料塞；8—电极；9—插销；10—爆炸桥丝。

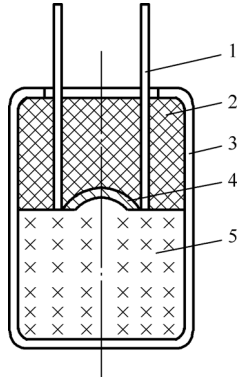
图 3-31 爆炸桥丝电雷管

雷管内装有比较敏感的猛炸药——太安。为了确保安全，爆炸桥丝雷管的装药装在一个很薄的金属壳内，不与爆炸线直接接触。在正常工作时，高能电源使爆炸桥丝爆炸，冲破金属壳而使猛炸药爆炸。当射频感应电流通入时，电流沿金属壳传到管体，即使感应电流足以使爆炸桥丝发热熔化，壳体內的炸药也不会发生意外爆炸。

桥丝一般为金线或铂线。猛炸药以太安最好。太安的密度一般在 $1.0 \sim 1.1 \text{g/cm}^3$ ，密度过大会使产品过于钝感。

2) 爆炸薄膜电雷管

爆炸桥丝电雷管比普通桥丝电雷管抗射频能力强，但受到某些干扰电源的刺激仍可发生意外。如加至爆炸桥丝上的电流虽不能使桥丝爆炸，但足以使其熔融，这就破坏了雷管的正常作用。用爆炸薄膜代替爆炸桥丝可改善雷管的性能。因为薄膜比桥丝有较大的表面积和截面积，当杂散电流通过时，热量在大面积上易于散失而不产生高温。薄膜形状可制成抛物面、椭球面或其他形状，使其产生收敛的冲击波，以提高能量密度。



1—电极；2—电极塞；3—雷管壳；
4—金属薄膜；5—猛炸药。

图 3-32 爆炸薄膜电雷管

起爆药压在套管中，并与主薄膜紧密接触，起爆药上面压猛炸药，装上盖片，装在管壳内并收口固定。

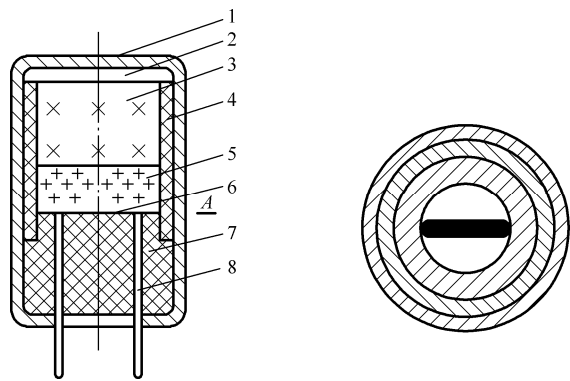
氧化铍陶瓷对电绝缘性好，热容量大且热传导率高，所以杂散电流通过金薄膜时，热量很快散失，膜的温度低于起爆药的发火点，保证了雷管安全。在正常工作时，输入电流功率较大，金薄膜迅速爆炸，引爆起爆药而使雷管爆炸。这类电雷管发火时间稳定，延期时间短，只需要一般电爆装置四分之一的能量就起爆，却能经受一般电爆装置所能经受的杂散电流的五至六倍。

为了使电能集中更有利于起爆。薄膜的中心部分可做得窄些，如图 3-34 (a) 所示。为了使薄膜与电极杆之间更可靠地接触，薄膜中心有更好的功率分布，可以在薄膜上的电极杆处再镀一层膜，如图 3-34 (b) 所示。为了提高电雷管作用的

图 3-32 是一种爆炸薄膜电雷管，这种雷管又称为冲击聚焦电雷管，金属管壳体内装猛炸药。塞子为非导电材料，其下端面制成凹形，凹形可为抛物面或椭球面等各种形状，凹形表面覆盖以导电薄膜。电极杆嵌在塞子中而与薄膜相连接。当导电膜爆炸时，在其曲率中心形成收敛冲击波，产生高温高压，因此可以起爆比较钝感的猛炸药。这种雷管只需要短时间、高强度电脉冲就能起爆（如 $5\mu\text{s}$, 0.5J ），因而对于杂散电流比较安全。

另一种爆炸薄膜电雷管——脉冲灵敏电雷管，如图 3-33 所示。氧化铍陶瓷的塞子，表面抛光并在端面镀金薄膜。电极杆嵌在塞子中并与金膜连通。

可靠性，也可做成双桥膜，如图 3-34 (c) 所示，



1—雷管壳；2—盖片；3—猛炸药；4—绝缘套管；5—起爆药；6—金属膜；7—电极塞；8—电极。

图 3-33 脉冲灵敏电雷管

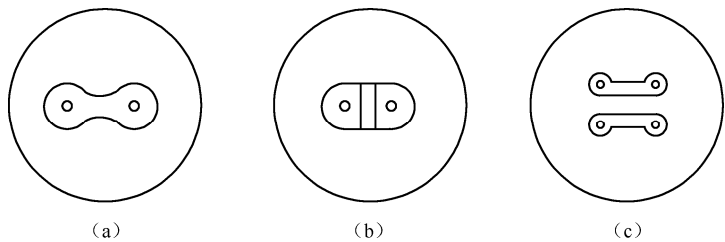


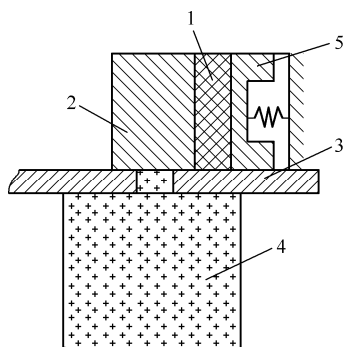
图 3-34 爆炸薄膜的形状

3.2.2 导爆药柱

导弹引信中典型传爆序列为：雷管—导爆药柱（管）—传爆管—主装药。导爆药柱和传爆管是爆炸序列的组成元件，都是装填猛炸药的火工品，它们的作用是传递并扩大雷管的爆轰，最终可靠引爆导弹战斗部主装药。

导弹战斗部装药量多，而且多数是用铸装法和螺旋压装法装填，不易起爆，单靠雷管的起爆能力不足以可靠起爆主装药，这就需起爆力大的导爆药柱及传爆药。在导弹传爆序列中，雷管是感度最高的元件，也是最危险的元件，为安全起见，常用保险型引信，这种引信中雷管与传爆药在解除保险前是隔离的，在引信发生意外雷管爆炸时，由于保险未解除，不会引爆传爆药和主装药。

在采用隔离装置的保险型引信中，雷管装在隔离装置的滑块或回转体里，形成错位结构的传爆序列。由于隔板的存在，雷管底部不可能紧贴着传爆管，而离开至少一个隔板厚度的距离。在解除保险后，雷管对正传爆药时，就是通过隔板或隔板上的孔去起爆。这时雷管的起爆能力会因通过金属隔板或空气介质而衰弱，从而造成起爆不可靠。为了可靠起爆传爆管，就需要在隔板孔中装入导爆药柱。



1—雷管；2—导引传爆药；3—隔板；
4—传爆药；5—滑块。

图 3-35 导弹传爆序列结构示意图

导弹传爆序列结构如图 3-35 所示。

由图 3-35 可以看出，隔爆装置在发射时，依靠保险装置将雷管锁定在隔爆安全状态。当导弹发射后，引信依靠不同的环境力逐级解除保险，将最终推动带有雷管的滑块，使雷管轴心与导爆管处在相对位置，锁定在发火状态。由此可见，雷管—导爆管成为独立隔爆机构，保证引信在发射过程中的安全性和安全距离。当隔爆机构处在发火状态时，要保证引信中爆轰传递和发火的可靠性。

1. 对导爆药柱的基本要求

导爆药柱在引爆系统中具有双重地位。对雷管来说，它是被发装药，对传爆管来说它是主发装药。为了完成双重任务它必须具备以下两个条件：

第一，作为被发装药时爆轰感度要大。当导爆药柱受到雷管爆轰能作用后，必须可靠起爆，因此要求作导爆药柱的炸药临界爆速及临界爆压要低。

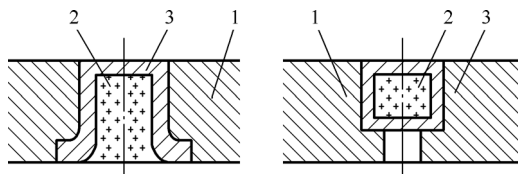
第二，作为主发装药时，应具有足够的起爆能力，即导爆药爆轰后能完全地起爆传爆药。为了保证可靠地引爆被发装药，主发装药的爆速必须大于被发装药的临界爆速。

2. 导爆药柱结构

导爆药柱的结构形式是根据不同使用条件确定的，主要的装药方法有三种：

(1) 预先压成药柱，再装入隔板孔或金属管壳内。这种方法简单经济，易于实现压药自动化。

(2) 预先压在管壳内制成导爆管（带壳的导爆药柱可称为导爆管），再装入隔板中。其结构如图 3-36 所示。



1—隔板；2—导引传爆药；3—导引传爆药壳。

图 3-36 导爆管结构示意图

这种方法较前一种复杂，但有三个优势：

- ① 能满足引信设计的一些特殊要求，如导爆药柱处在两个零件之间。
- ② 在引信装配中，可以把导爆管的装配放在装配工序的最后，这样有利于装

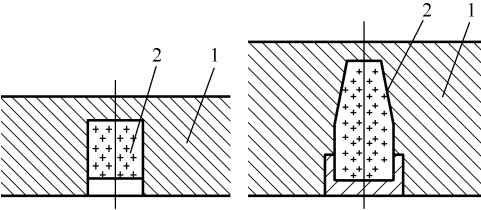
配工序的安全。

③ 可以采用难以压制而威力大的猛炸药（如黑索金）作导爆药柱，因为这样密封在壳内的药柱不会碎裂及损坏。这种装药方法的缺点是，导爆管的管壳外径与隔板孔的间隙大小对于它的起爆能力很有影响。如果间隙较大，则会大大影响轴向起爆力。为了克服这一缺点，目前我国采用的导爆管壳与隔板孔都是动配合，其间隙在 0~0.175mm 范围内，在装配过程中导爆管外涂以虫胶漆，以填满间隙。径向间隙对起爆概率影响的试验结果如表 3-7 所示。

表 3-7 径向间隙对起爆概率的影响

径向间隙尺寸/mm	0	0.102	0.203
起爆概率/%	100	40	0
试验数量/发	10	10	10

(3) 将猛炸药直接压入隔板孔内。这种方法的优点是炸药可充满隔板孔。没有径向间隙，但对工艺以及模具的要求较高，压药后而不得突出隔板平面，也不能凹下过多，一般规定凹入量不得超过 0.2~0.5mm。直接压入式导爆药柱结构如图 3-37 所示。



1—隔板；2—导引传爆药。

图 3-37 直接压入式导爆药柱结构示意图

这种结构是将药剂直接压入隔板孔中。优点是无径向间隙，省去了壳体。但是，对压药模具及工艺要求较高，冲头必须与隔板孔很好地对正，并有均匀的间隙。压药后药面不得突出隔板平面，也不得凹入过多。一般规定药面凹入量不得超过 0.2~0.5mm。因为凹入量过多，即导引传爆药和传爆药空气间隙过大，从而衰减了起爆冲击波，降低了其起爆能力。

3. 导爆药的选择

比较目前几种常用猛炸药如太安、黑索金、特屈儿和梯恩梯，它们的临界爆速都在 2000~3000m/s，相差不大，而爆速则有较大差别。从爆速角度出发，选黑索金、太安作为导爆药比较好；从工艺角度考虑，特屈儿最好，但因特屈儿毒性大，压药时粉尘多，因此逐渐被钝化太安代替。钝化太安和钝化黑索与特屈儿相比，有爆速高、热安定性好等优点。

4. 装药密度的确定

炸药的爆速随装药密度的增大而增高，但随着装药密度的增加，炸药的临界爆速也增高。以黑索金为例，当装药密度为 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ 时，它的临界爆速为 2300m/s ；当密度为 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 时，它的临界爆速为 2800m/s 。这说明炸药随密度的增大，其爆轰感度降低。因此，在选择导爆药的装药密度时的原则应是：既要保证药柱易于被雷管起爆，又要保证能可靠地起爆传爆管。引信中实际使用的导爆药柱的装药密度，太安和特屈儿通常为 $1.5\sim 1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，钝化黑索金最好大于 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，聚黑-6C 和聚黑-14C 为 $1.2\sim 1.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，聚奥-9C 密度则为 $1.7\sim 1.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，以保证药剂有足够的结合强度，防止裂纹和破碎。

5. 装药量的确定

确定导爆药的药量原则是要保证它有足够的起爆能力。如果药量太少，就不足以使导引传爆药达到稳定的爆轰。药量的多少与导引传爆药和传爆药的品种有关，也与它们的接触面积和接触的情况（直接接触还是有纸热等缓冲物）有关。在引信中实际采用的导爆药柱的药量，一般相当于传爆管装药量的 $1/30$ 左右。

6. 导爆药柱直径和长度

导爆药柱作为主发装药看待时，希望其直径大一些，以增大起爆能力。因为直径增大时，导引传爆药与被起爆的装药（传爆药）的接触面积就大，放出的能量就增多，可以及时补充爆轰波沿炸药传播时所损失的能量，减少了爆轰生成物侧向飞散损失所占的比例，提高了导引传爆药能量的利用率，因而起爆能力增大。作为被发装药看待时，其直径等于雷管直径或稍小于雷管直径时，可以被雷管完全起爆。由于它在引信传爆系列中的双重作用，在引信中实际采用的直径略大于雷管直径。

导爆药柱不论是带壳的，或是直接压入隔板中，均属有壳的（指径向），因此药柱的长度可压得小一些。实际使用时导爆药柱的长度近似其直径，而有时导爆药的长度是由隔板厚度确定，而隔板厚度则是由可靠隔离的要求确定。

3.2.3 传爆管

传爆管是引信传爆系列中最后一个火工元件，它的主要作用是扩大爆轰，以达到完全起爆导弹战斗部装药的目的。与导爆药柱相同，传爆管也由猛炸药加工而成，在引信中同样具有双重地位，且输入和输出都是爆炸作用。因此，导爆药柱和传爆管战术技术要求是一致的，只是传爆管比导爆药柱的尺寸要大，药量要多，结构上也各有不同。

1. 对传爆管的基本要求

传爆管在传爆序列中具有双重地位。对导爆药柱来说，它是被发装药，对导弹战斗部装药来说它是主发装药。为完成双重任务它必须具备以下两个条件：

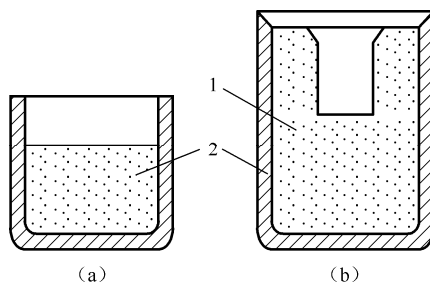
第一，作为被发装药时爆轰感度要大。当传爆管受到导爆药柱爆轰能作用后，

必须可靠起爆，因此要求作传爆管的炸药临界爆速及临界爆压要低。

第二，作为主发装药时，应具有足够的起爆能力，即传爆管爆轰后能完全地起爆战斗部装药。为了保证可靠地引爆被发装药，主发装药的爆速必须大于被发装药的临界爆速。

2. 传爆管结构

传爆药压入管内的形式基本上为两种，如图 3-38 所示。一种是直接压入管壳内（图 3-38（a）），另一种是传爆药压成带有雷管孔的药柱后再装入管壳内（图 3-38（b））。



1—装药；2—雷管壳。

图 3-38 传爆药压入管内的形式

3. 传爆药的选择

与导爆药相比，传爆药的起爆能力要大。传爆药的选择要从药剂爆轰感和起爆能力两方面综合考虑，有两方面的含义：①感度适中，能有效地承接导爆药柱输出的爆轰能量，并可靠起爆；②要求其爆速大于被起爆战斗部装药的临界爆速。因为爆速大能使被起爆的装药受到更强烈的压缩，在被起爆的装药中产生很大的应力，使被起爆的炸药微粒间发生很快的位移和剪切，炸药发生局部温度升高，有利于形成大量“热点”，因而有利于起爆。

目前，国内常用的传爆药主要有太安、黑索金和特屈儿，还有改性猛炸药，如聚黑-14（JH-14C）、聚黑-6（JH-6C）、聚奥-9（JO-9C）、聚奥-10（JO-10C）、钝黑-5（DH-5C）等。另外，国内也有对一种钝感传爆药的研制，这种传爆药命名为聚黑苯（JHB-1），其主要组分和配比为 TATB/RDX/EVA 黏合剂（48/48/4），它的性能为：撞击感和冲击波感度远小于特屈儿；爆速高于特屈儿；在慢速烘焙条件下只发生温和的反应（特屈儿则发生了爆轰）。

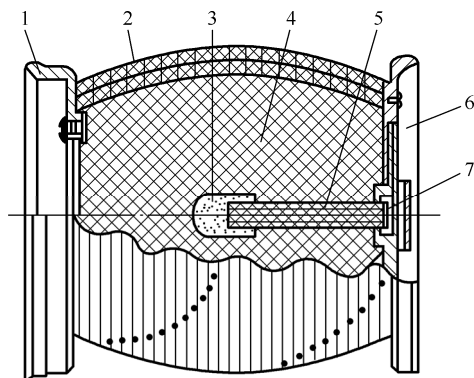
4. 装药密度的确定

对传爆药而言，主要考虑其输出威力大小，所以，装药密度应为其所选传爆药理论密度的 90%~95%。有时为兼顾输入感和威力的两方面，传爆药柱可分两层压制：与导爆管相邻的一层密度低些，以增加感度；而与战斗部装药相邻的一层密度高些，以提高爆速，使主装药迅速达到稳定爆轰。两层的密度差值可达

0.3g/cm³左右。

5. 装药量的确定

为确保传爆管作用可靠，普通弹药传爆药的药量通常取为战斗部装药量的0.5%~2.5%。对于一些大威力的导弹战斗部，仅用引信传爆药不能足以完全起爆战斗部装药，此时需在战斗部内放置辅助传爆药柱，又称为扩爆药柱，将传爆药能进一步放大，以保证其对大威力导弹战斗部的起爆能力。如图 3-39 所示的战斗部结构中，为完成起爆战斗部，就采用了传爆管与传爆药柱相结合的方式。

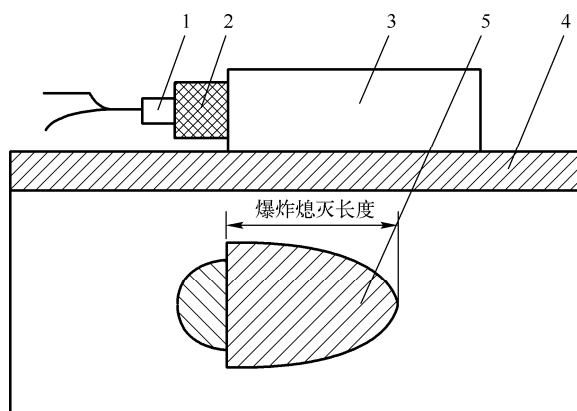


1—后法兰盘；2—本体（圆环）；3—传爆药柱；4—炸药；5—传爆管；6—前法兰盘；7—垫片。

图 3-39 圆环叠加点焊式杀伤战斗部

6. 传爆管的直径和长度

传爆管的起爆能力与其直径和长度有着直接的关系。传爆药起爆能力测试装置如图 3-40 所示。



1—雷管；2—传爆药柱；3—炸药柱；4—铜板；5—铜板上印痕。

图 3-40 传爆药起爆能力测试装置

起爆能力测试方法如下：

将电雷管、传爆药柱和被起爆药柱一起固定在一块铜板上，通电使雷管爆炸，然后引发被起爆药柱爆炸。被起爆药柱爆炸后在铜板上炸出一些印痕，此印痕称为爆炸熄灭长度，用它来评价传爆药的起爆能力。熄灭长度越大，传爆药的起爆能力越大。

试验中所使用的传爆药为特屈儿，密度为 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，炸药柱为混合炸药，其硝酸铵/梯恩梯质量分数为 90/10，密度为 $1.66\text{g}/\text{cm}^3$ ，试验结果见表 3-8。

表 3-8 传爆药量与起爆能力的关系

药量/g	直径/mm	高度/mm	在铜板上熄灭长度/mm
8	24	11.8	54
12	24	17.1	60
16	24	21.5	69
20	24	27.8	74
25	24	34.5	78
35	24	48.0	81

结果表明，传爆药直径一定时，在一定范围内药量增加，药高增加，起爆能力增加。但是，当高度近似为直径的 2 倍时，炸药的爆炸熄灭长度不再增加，亦即起爆能力不再增加。由此可见，当直径一定，利用轴向起爆时，在一定范围内增加传爆药高度是有益的，但是若把它设计得太长，长径比超过 2 也是不恰当的。同理，若高度一定，增加药量时，就增大了直径，起爆能力也就增大。

7. 传爆药的位置

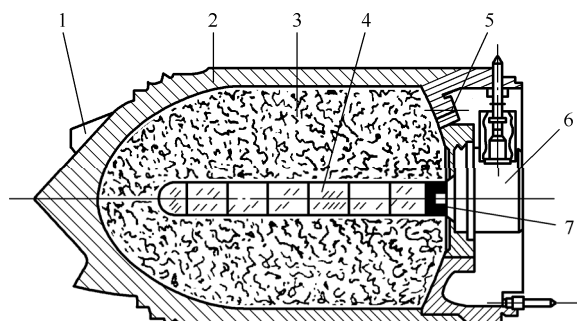
同一传爆药，它所处的位置不同其起爆能力也有所不同。把传爆药埋入装药里会显著地增加其起爆能力。用特屈儿作传爆药（密度为 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，直径为 25mm，重 38g），起爆混合炸药硝酸铵/梯恩梯质量分数为 90/10（密度为 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ ，长度为 100mm），传爆药位置与起爆能力的关系见表 3-9。

表 3-9 传爆药位置与起爆能力的关系

传 爆 药			在铜板上的 熄灭长度/mm
埋入深度/mm	药量/g	直径/mm	
表面接触	38	25	87
10	38	25	97
23	38	25	110

传爆药埋入越深，传爆药爆轰生成物径向的飞散损失越小；传爆药埋在装药里面时，不仅利用了传爆药的轴向起爆，还利用了侧向起爆，埋得越深，起爆表

面越大，因此，起爆能力也就越强。导弹战斗部中，为提高传爆药起爆能力，通常采用埋入式。战斗部在制作时就已经留有了传爆管安装孔，图 3-41 为“飞鱼”系列导弹战斗部。



1—防跳弹爪；2—壳体；3—炸药；4—传爆药；5—底部；6—引信；7—起爆药。

图 3-41 “飞鱼”系列导弹战斗部

8. 传爆管的外壳

导弹传爆药通常不直接与被起爆装药接触，传爆管外壳会影响爆速，因此也就会影响到传爆药的起爆能力。例如，特屈儿作传爆药（密度为 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，直径为 28mm）轴向起爆紧贴的硝酸铵/梯恩梯质量分数为 90/10 时，在无外壳时爆炸熄爆长度为 87mm，而有厚为 2mm 的传爆管壳时，其爆炸熄爆长度为 90mm。

3.3 做功类火工品

在导弹飞行过程中，通常需要执行一系列的动作或完成状态转换，如导弹助推器的分离，弹翼的展开、供油或供气通路的开启等，在这些过程中，都会用到做功类火工品。做功类火工品通常分为火药做功火工品和炸药做功火工品。火药做功火工品利用火药燃烧时产生气体的压力做功，如利用燃气发生器产生的气体实现导弹引信状态调整，或者利用气体压力推动活门动作，完成某种任务（如活塞机构）；炸药做功火工品利用炸药爆炸时产生的冲击波压力达到破坏、分离或解脱某些连接部分（如爆炸螺栓）。

导弹用做功类火工品主要有燃气发生器、电爆管、活塞式作动装置（如活塞式推冲器或活塞式拔销器）、点分离装置（如爆炸螺栓或爆炸螺母）、线分离装置（聚能切割索、膨胀管分离装置）等。

3.3.1 燃气发生器

高压气源是导弹工作的重要能源之一，导弹工作状态转换可通过储存式高压气瓶放气推动活塞做功来实现，然而储存式高压气瓶存在储存期短（<10 年）、

维护故障率高等缺陷。为克服储存式高压气瓶放气工作方式的缺点，在导弹武器系统许多工作环节上，采用固体燃气发生器代替高压气瓶提供动力能源。固体燃气发生器是一种先进火工装置，可以按照设计产生特定规律的气体，具有结构简单、体积小、作用迅速等特点，已在航空航天领域广泛应用。其主要依靠内部主装药燃烧产生的高温高压燃气工作，无机械运动部件，具有产气规律可控、战备时间短（零准备时间）、储存寿命长（>17 年）、寿命期限内免维护等诸多突出优点。

3.3.1.1 结构

1. 单高压室固体燃气发生器

单高压室燃气发生器结构如图 3-42 所示。其工作原理为：接到控制信号后，点火机构点火，将高压室内部的主装药点燃，燃烧的主装药产生高温高压燃气，燃气通过气体通路进入低压室壳体，经过过滤冷却机构后，排出燃气发生器，完成工作过程。

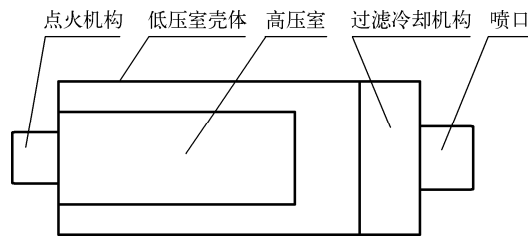


图 3-42 单高压室燃气发生器结构

2. 多高压室燃气发生器

该燃气发生器设计为四联装捆绑式结构，即将 4 个相同功能的烟火式气体发生器设计为一体，共享 1 套点火机构，但是设计了 4 个高压室，结构如图 3-43 所示。该新型烟火式气体发生器点火后，4 个独立的高压室同时燃烧，高温燃气经过独立的过滤冷却后汇聚到喷口，并排出燃气发生器，完成工作过程。

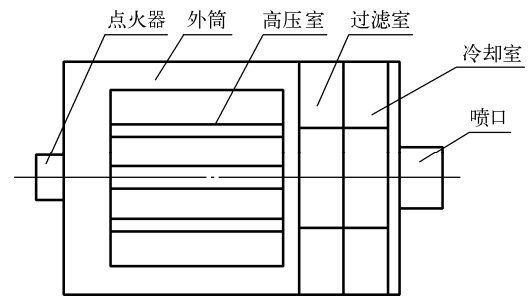


图 3-43 多燃烧室燃气发生器结构

3.3.1.2 组成

燃气发生器主要由装药、电点火机构、燃气过滤器和壳体等组成，其中装药是燃气发生器的重要组件之一，也是决定燃气发生器性能的关键部分。

1. 装药

固体燃气发生器的主装药采用基于第2代产气药技术的 AHYG-2 产气药，该产气药相较于第1代基于叠氮化钠的产气药具有如下优点：

(1) 绿色环保。燃烧产物除固相物质外，主要成分为水及氮气。药剂本身及燃烧产物对人体基本无毒害，避免了第1代产气药剂对操作人员的身体损害。

(2) 比容高。比容大于 500mL/g，保证与多高压室类型的气体发生器达到相同功能，而装药量减少 30%以上。

主装药采用压制成型的方式进行装填。粉末状主装药压制为密度大于 1.93g/cm^3 的环状结构药柱，环状结构的药柱外表面采用硅橡胶进行包覆阻燃，装填入高压室后，药环间的接触面使用“梅花”形垫片隔开，如图 3-44 所示。

进行包覆后的药环呈减面燃烧，保证燃气发生器在工作的前期具有最大做功能力，减少后期做不必要的功，利于燃面规律的控制及装药量的最小化。

2. 点火机构

点火机构采取逐级放大的中心点火方式。点火机构如图 3-45 所示。

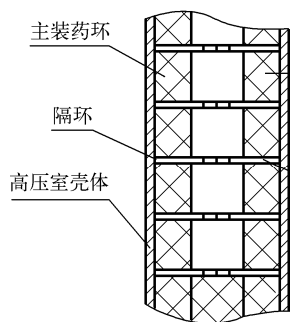


图 3-44 压制成型主装药结构图

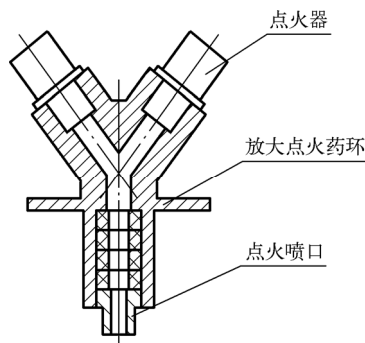


图 3-45 点火机构结构图

燃气发生器的点火依靠 2 个点火器进行初始点火，点火器的点火能量经过放大点火药环的放大作用后，由点火喷嘴进入高压室。该点火方式一方面使点火能量集中释放，有利于点火能量的高效利用；另一方面，由中心部位对整个高压室内部的全部装药进行同步点火，满足了内弹道的“中心、高能量点火”设计原则，有效避免膛内压力波的产生，使燃气的输出特性更加稳定易控。

3. 金属压制网过滤冷却机构

燃气发生器采用金属丝压制成型过滤网作为燃气过滤手段，该压制过滤网片采用丝径 0.6mm 的 0Cr18Ni9 不锈钢丝经模具压制成型，如图 3-46 所示。

该压制成型过滤网可以依据过滤精度要求设计为特定的厚度及密度，一方面提高滤饼的包容率，降低内部压力对过滤网的破坏，另一方面通过吸收燃气热量或部分材料气化来降低燃气温度。该过滤网的材料耐热性能不及钨丝及钼丝，但其特殊的工作原理使过滤网整体耐温性能大幅提高。此外，可依据使用需求压制为任意形状直接装填，不需要设计特殊的紧固及支撑装置。



图 3-46 压制成型过滤网

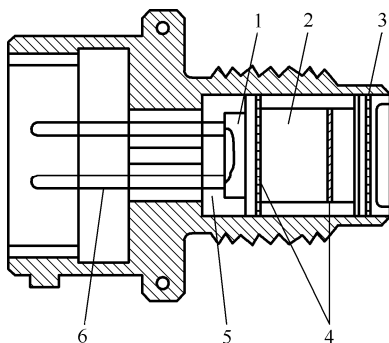
3.3.2 电爆管

电爆管是动力源火工品的一种，主要利用气体产物压力做功。其结构简单，作用可靠，广泛应用于航空航天等领域。电爆管装有推进剂（发射药），能在短时间内产生热及高压气体，具有快速增压作用。电爆管和气体发生器功用相似，利用装在电爆管壳体中的火药柱燃烧产生的气体压力，打开有关气路或油路中的活门，属于做功类火工品。

例如：在导弹供油系统中的电爆管，通常用来打开高压气瓶通向油箱气路中的电爆活门，把燃油剂压向燃烧室；在导弹发动机系统中的电爆管，用来打开燃油启动活门，并使燃油在燃烧室内加以雾化；在导弹飞行控制系统中的电爆管，用来产生压力，控制调节器的油门，使进入燃烧室的燃油减少，以减小主发动机的推力，即转换主发动机的工作状态。

3.3.2.1 电爆管结构

电爆管主要由壳体、插塞组件、起爆药、点火药及主装药等组成。电爆管的结构原理与电发火管基本一致，主要区别在于壳体、插塞、接插方式及密封设计等。装有玻璃插塞的典型电爆管的结构如图 3-47 所示。



1—起爆药；2—主装药；3—挡板；4—绝缘片；5—插塞；6—插针。

图 3-47 装有玻璃插塞的典型电爆管

它有一个发火件，在壳体内装有压制的发射药作为主装药，发射药产生一定量的气体和所需要的温度。由于气体量较少，所以，用电爆管引爆的火工装置必须在很短的时间内做功，否则其性能将会由于热气体与周围介质的热交换而大大降低。如上述玻璃插塞电爆管，在体积为 10cm^3 的密闭容腔内，可在 $5\sim 10\text{ms}$ 时间内，产生高达 31MPa 的压力峰值。

电爆管可用于驱动分离螺母与螺栓、活门、抛射系统、压力泵、开关、活塞装置及切割器。

3.3.2.2 电爆管分类

电爆管按功率分为大功率、中功率、小功率三类电爆管；按起爆方式分为电热式、电弧式、半导体式及火花隙式起爆电爆管；按起爆的敏感度又分为敏感电爆管和钝感电爆管。对于战术导弹来讲，一般多采用电热式起爆的敏感或钝感电爆管组。

1. 敏感电爆管组

50mA、5min 不起爆，可靠发火电流为 1A；

200mA、5min 不起爆，可靠发火电流为 2A；

500mA、5min 不起爆，可靠发火电流为 5A。

对于敏感电爆管的发火延时时间一般不大于 20ms ，延时长短与发火电流的大小有关。如安全电流为 50mA 的电爆管，发火电流为 1.9A 时，延时时间为 15ms 左右；发火电流为 2.9A 时，延时发火时间为 6ms ；发火电流为 5.7A 时，延时发火时间为 3.5ms 。

2. 钝感电爆管组

1A、1W、5min 不起爆的电爆管称为钝感电爆管，其最佳工作电流为 $5\sim 8\text{A}$ 。

此类电爆管抗静电感应和电磁感应及防雷电等性能均优于敏感电爆管，但其要求的可靠发火电流较大，如果导弹上使用的数量多，则要求电源容量加大，故又限制了它的使用，所以应视具体情况而选用。钝感电爆管发火延时时间一般不大于 30ms ，如有两个以上并联使用时，其发火不同步性比敏感电爆管要大些。

3.3.3 作动装置

在导弹弹射、弹翼的展开及飞行姿态调整等过程中，都会用到作动装置。它利用电能使装填的烟火药爆燃以产生推力做功，现已广泛用于导弹武器及航天系统。这类线性运动装置主要包括驱动器、推冲器、拔销器、切割器、阀门、开关等。作动装置又有火药作动装置和活塞式作动装置之分。其中，活塞式作动装置按其发火后工作状态分为伸长型和缩回型两类，前者的典型代表是活塞式推冲器，后者的典型代表是活塞式拔销器。

3.3.3.1 火药推冲器

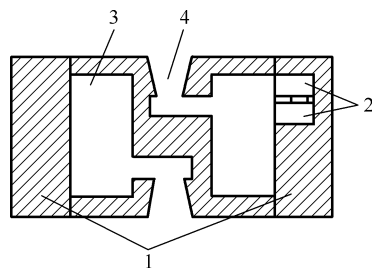
火药推冲器直接利用主装药燃气的高速横向喷流形成的反作用力，实现对弹

体的飞行轨道修正。

1. 燃气脉冲推冲器

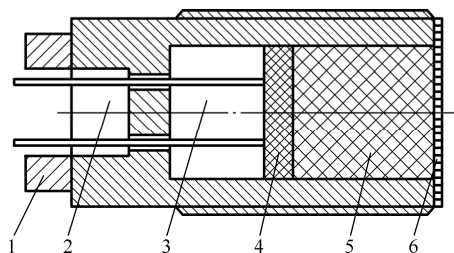
燃气脉冲推冲器安装在导弹的质心位置，利用它产生的侧向脉冲推力以直接力的形式使弹体的飞行轨道发生横向偏移，最终实现末端弹道修正，提高命中精度。其结构示意图如图 3-48 所示。

它主要由底座、燃烧室（体积约 11.5cm^3 ）、喷管（喉径约为 7mm ）和点火具等组成。每个底座上安装有 7 个点火具，共用一个燃烧室和一个喷管，各点火具由逻辑控制指令顺序点火，产生的燃气先进入燃烧室然后喷出喷管，最终形成脉冲推力。点火具结构示意图如图 3-49 所示。



1—底座；2—点火具；3—燃烧室；4—喷管。

图 3-48 燃气脉冲推冲器结构示意图



1—安装用六角螺母；2—灌封；3—陶瓷塞；4—点火药；5—主装药；6—钢制密封盘。

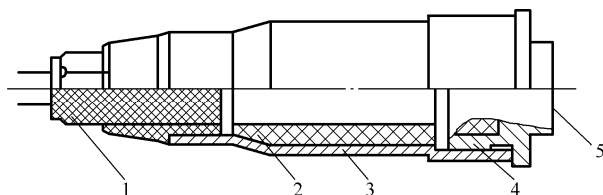
图 3-49 点火具结构示意图

每个点火具所装的点火药量为 100mg ，配方为 $\text{B}/\text{CaCrO}_4/\text{Ti}/\text{KClO}_4$ 四种组分，主装药为 210mg 的高氯酸铵和四甲基胺高氯酸盐混合物，采用粒状药自由装填。为确保密封性和安全性，在点火具的输出端焊接了一块 0.13mm 厚的钢制圆板，并在点火引线输入端进行了灌装密封。点火具采用桥丝式电发火，全发火电流为 3.5A ，能满足 $1\text{A}/1\text{W}$ 不发火的安全要求。

单个点火具的输出性能是：点火延迟时间（从电流通入开始到 1% 燃烧室峰值压力的时间）为 0.84ms ，作用时间（燃烧室压力—时间曲线上压力上升段 1% 峰值压力到压力下降段 0.28MPa 之间的时间）约为 2.11ms ，输出冲量约为 $0.54\text{N}\cdot\text{s}$ 。利用它进行弹道修正时，弹体在每旋转一周内将获得两次控制脉冲，产生的脉冲推力主要以力矩的形式施加在弹体上，通过改变弹体的姿态最终实现变轨。这种作用方式可以较好地满足对机动性或制导精度要求较高的如高速动能拦截弹、超高速导弹等弹体的应用需求。

2. 高速动能拦截弹推冲器

某型高速动能拦截弹的推冲器结构如图 3-50 所示。推冲器的总长度约为 46mm，最大外径为 13mm。为减轻推冲器的质量并确保结构强度，它采用了以超硬铝材料为内衬、碳纤维加环氧树脂缠绕层为外层的复合燃烧室壳体结构，以及以石墨为喉衬、超硬铝材料为支撑结构的复合喷管；为缩短点火延迟时间，推冲器的点火装置采用半导体桥作为发火元件，并选用点火能力较强的镁/聚四氟乙烯作为点火药；为尽可能缩短推冲器的作用时间，它采用内燃贴壁浇铸式的少烟高燃速的丁羟复合推进剂（在 10MPa 下的燃速为 80mm/s）作为主装药。研究表明，该推冲器的点火延迟时间（点火信号触发到点火装置发火的时间间隔）小于 0.5ms，作用时间（推力—时间曲线上推力上升至最大推力 30%，到下降至最大推力 30% 之间的时间间隔）为 9~12ms，冲量为 3.5~6.0N·s。



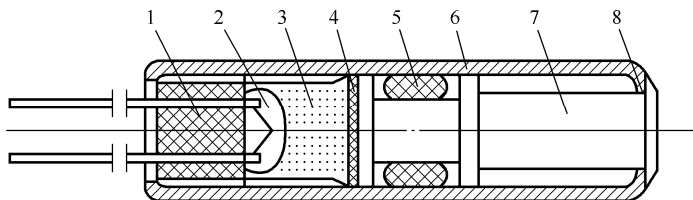
1—点火装置；2—主装药；3—燃烧室壳体；4—喷管；5—喷管堵盖。

图 3-50 某型高速动能拦截弹的推冲器结构示意图

3.3.3.2 活塞式推冲器

1. 结构

活塞式推冲器主要由电极塞、点火药、推送药、盖片、密封环、壳体、活塞杆、密封胶等组成。典型结构如图 3-51 所示。



1—电极塞；2—点火药；3—推送药；4—盖片；5—密封环；6—壳体；7—活塞杆；8—密封胶。

图 3-51 活塞式推冲器的典型结构

活塞式推冲器基于内燃机原理，把热能变成导弹作动机械能，可以认为是装有单发装药的、一次性作用的单冲程内燃机。

活塞式推冲器作用过程是：当发火管通电时，点火药装药将发生爆燃并迅速产生高压高温气体，该气体使活塞末端与发火管之间的初始容腔增压，继而推动

活塞上的预加负载以极高的速度运动到所要求的冲程长度，预加负载是类似插头座分离所必须克服的连接力。为了使运动活塞完成预定的动作，往往将活塞端头设计成和负载相适应的各种结构。为防止做功前推冲器的活塞杆在外加负载时会出现位移，往往在活塞杆上需要设计止推结构，如锁定剪切销等。

活塞式推冲器在导弹上的应用非常广泛，可用于导弹发射时解脱发射架的锁定、引信保险的解脱，推动电子舱的开关装置，打开弹上的电路。如果活塞的端部为尖形，则可用于刺破导弹上气瓶口部的金属箔，放出气体供弹上陀螺工作，控制舱机动作等。如果活塞端部为环形刀，则可用于切割。活塞式推冲器的输出特性主要是力或速度，如级间分离要求的是相对分离速度，而用于切割器时则要求的是推力。决定活塞式推冲器输出特性的主要因素是推冲器的结构和装药量。在结构上，一般要求采用较厚的筒壁，以保证输出压力峰值对预加负载有较大的裕度。

2. 组成

1) 装药

为满足小型活塞式推冲器所需的输出速度或推力，一般只装少量的点火药。由于活塞式推冲器体积小，结构设计相当紧凑，在活塞产生运动前的初始容积很小，因此，要绝对避免使用强起爆药和炸药，否则，爆轰将使推冲器完全碎裂。活塞式推冲器装药通常采用混合点火药、发射药、弱起爆药等，如使用氯酸钾（50%）、硫氰酸铅（47%）和铬酸铅（3%）组成的混合药，经 40%硝基漆调均后灌注到发火管内。另外，某产品曾使用了细结晶的弱起爆药斯蒂芬酸铅。

在装药量的选择上，首先应能切断剪切销，然后在克服摩擦力的前提下，再推动活塞杆向前运动。活塞杆端面受到的起动压力 F 应大于或等于切断剪切销的止推力 F_1 、活塞组件运动与壳体内壁的摩擦力 F_2 及外负载 F_3 之和，即存在

$$F=F_1+F_2+F_3 \quad (3-1)$$

2) 密封件

活塞式推冲器的输出特性很大程度上取决于推冲器的密封性。密封失效将使活塞式推冲器输出推力或速度下降，冲程不能完全释放，从而导致装置作用不可靠。所以，发火后，活塞式推冲器的活塞与筒体之间的运动密封必须可靠。这通常采用“O”形密封圈予以保证。由于发火瞬间产生的压力峰值极高，所以，应尽可能地增大“O”形密封圈的压缩量，如采取缩小“O”形密封圈的安装槽尺寸等。

除了在活塞与筒体之间必须采取可靠的运动密封外，整个非运动组件在高压燃气下不应对外发生泄漏。通常产生泄漏的地方有：一是插座基体和插针之间，由于材料收缩率不一致往往形成微漏通道；二是在“O”形密封圈受燃气压力作用变形和形成紧密密封之前存在一个时间间隙，此时，燃气可以绕过“O”形密

封圈而进入活塞另一端空间向外泄漏燃气，这可以通过在活塞末端“O”形密封圈前设置挡焰环予以解决。

3.3.3.3 活塞式拔销器

拔销器是将电发火管与机械运动机构结合成一体火工装置，有体积小、重量轻、所需激发能量小、使用安全、作用可靠等特点，能够有效降低总体承载方向的冲击。国外在航空航天飞行器、导弹、火箭与水下武器中，将拔销器应用在保险与解除保险装置、启动陀螺和阀门启动等方面。近几年来，我国陆续研制了多种拔销器，并应用在导弹引信解除保险、运载火箭的固定与解脱机构、导弹和火箭在发射筒中的挡弹机构等方面。

拔销器一般由发火元件、装药、功能机构组成，设计时常常将发火元件、装药组成各类点火器。拔销器的结构形式主要有两种：一种是发火元件、装药与活塞机构在同一轴线上，装药产生的高温高压气体通过活塞机构，作用于活塞完成拔销功能；另一种是发火元件、装药与活塞机构垂直，气体从活塞机构侧向孔作用于活塞。这两种拔销器的共同特点都是利用装药产生的高温高压气体使活塞回缩做功。

1. 第一种活塞式拔销器

该结构如图 3-52 所示。由主装药、活塞、壳体、堵盖和剪切销组成，且在同一轴线上。产品的工作原理为：作用前剪切销将活塞和壳体定位，限制活塞活动，实现对某发动机进气道机械堵盖结构的锁定任务。在接到起爆信号后，双发电起爆器中的任一发作用点燃主装药，产生高温高压燃气推动活塞运动，活塞前进剪断剪切销，运动到位后被锁止，完成解锁功能。

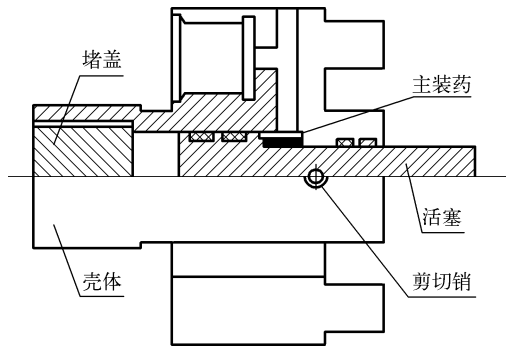


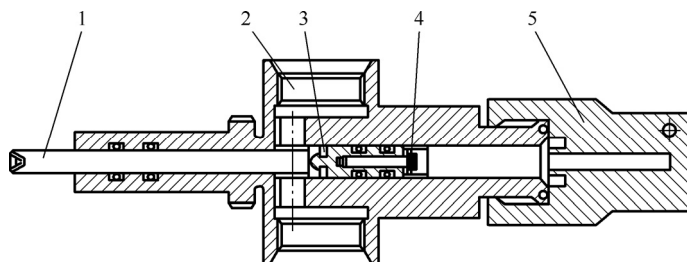
图 3-52 第一种活塞式拔销器结构图

2. 第二种活塞式拔销器

它主要由柱状管壳、销子、剪切销、压力药筒、密封件、冲击吸能帽等组成。结构如图 3-53 所示。

它是一次性作用的单冲程装置，其作用过程是：当任一个压力药筒发火后，

其输出的高温高压气体通过一个 25mm 的小孔排出，进入体积极小的自由容腔以便给活塞的销子一端施压，压力增大到一定值后将剪切销切断并推动活塞，活塞向内运动拉出伸在外面的销子。销子缩回 12mm 后，活塞停止在冲击吸能帽内。冲击吸能帽实际上是一个薄壁钢扁壳，主要用于消除来自活塞和销子的过多能量，且防止其反弹。为了保证作用的可靠性，拔销器配有两个起爆器。



1—销子；2—起爆器插口；3—剪切销；4—冲击吸能帽；5—密封帽。

图 3-53 第二种活塞式拔销器结构图

3.3.4 点式分离火工装置

导弹及航天飞行器级间分离、整流罩分离、舱段分离等都需要使用分离类火工装置。该类火工装置在使用时要完成两种不同的功能：在分离之前要确保两个分离部件可靠地连接；在分离时，要保证两个分离部件可靠地分离，并要确保分离过程中或分离之后，不产生影响续航级正常飞行的危害。所以说，对于导弹武器系统而言，选择一种合适的火工分离装置是至关重要的。对火工分离装置基本要求如下：

- (1) 连接承载要求。分离前保证导弹本体与被分离部件连接可靠、定位准确。
- (2) 可靠分离要求。装置应使被分离部分与导弹本体迅速、准确而可靠地解锁与分离，必须保证解锁与分离的可靠性。
- (3) 分离冲击要求。在分离过程中要求对导弹本体冲击、扰动小，不损伤导弹本体。
- (4) 密封要求。装置分离后要保证其弹体含有的雷达、引信、高度表等窗口不受污染影响制导。
- (5) 维护性要求。装置应简单、运动灵活、易于调整，使用维护方便。

导弹分离火工装置主要有点式分离和线型分离两大类。在点式分离类火工装置中，螺栓螺母类火工装置应用极其广泛，它又可具体细分为爆炸螺栓、爆炸螺母、分离螺栓等几类，其中爆炸螺栓及螺母通常内装大药量猛炸药，而分离螺栓内仅装推进剂或烟火药，它们作用后均能使两个相连的物体完成点式分离。

3.3.4.1 爆炸螺栓及螺母

1. 爆炸螺栓

爆炸螺栓是较早应用于导弹的一种火工分离装置，爆炸螺栓是利用所装炸药产生的拉伸、剪切力学效应，使指定的部位断裂来完成解锁功能。爆炸螺栓在分离机构中的安装比较简单，通过拧紧螺母或螺栓体即可将两个目标连为一体。图 3-54 为典型的爆炸螺栓在导弹上的安装结构图，爆炸螺栓分离后由二级发动机推力、气动阻力产生加速度差实现弹体分离。

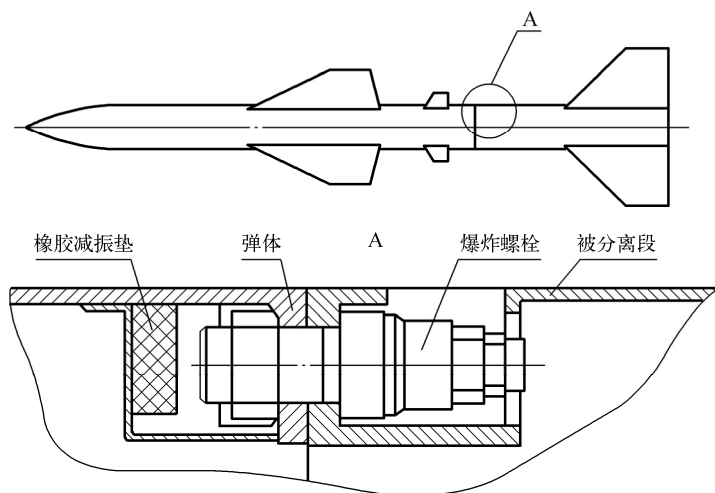


图 3-54 爆炸螺栓在导弹上的安装结构图

运载火箭的整流罩横向解锁面一般采用多个爆炸螺栓进行连接，爆炸螺栓具备承载和分离的双重功能，即在整流罩横向分离动作之前爆炸螺栓承担着轴力、剪力和弯矩等截面载荷，在整流罩横向分离时，爆炸螺栓通过高能炸药的爆炸将预先设置的薄弱位置拉断或剪断，实现分离动作。爆炸螺栓与整流罩横向解锁面连接如图 3-55 所示。

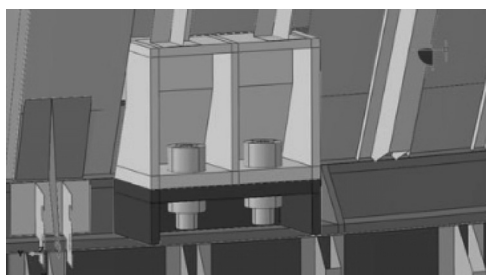
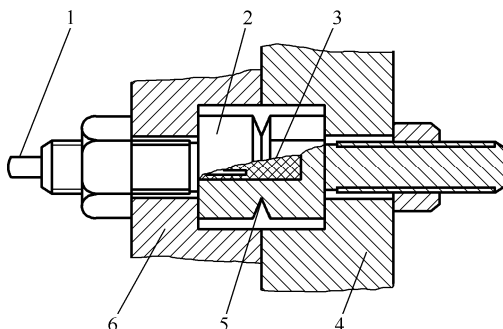


图 3-55 爆炸螺栓与整流罩横向解锁面连接图

典型的爆炸螺栓有削弱槽式爆炸螺栓、剪切式爆炸螺栓和剪切销式爆炸螺栓。

1) 削弱槽式爆炸螺栓

削弱槽式爆炸螺栓结构如图 3-56 所示。在爆炸螺栓圆柱形药室的外壁上，预先开一圈环性凹槽，形成一个强度上的薄弱环节。爆炸螺栓作为将 2 个物体连接在一起的一个连接件，在分离时，当药室内装猛炸药发生爆炸作用后，药室内的压力升高，当压力增高到开槽部位的断裂强度时，螺栓将断裂，2 个被连接的物体被分为两体。这种常规爆炸螺栓结构简单，且在螺栓头和本体分离时不产生碎片，但由于爆炸产物会从分离面溢出，会对周围设备或环境造成污染，所以不适合在要求高度清洁的地方使用。



1—导线；2—爆炸螺栓；3—猛炸药；4、6—被连接结构；5—断裂面。

图 3-56 削弱槽式爆炸螺栓结构示意图

2) 剪切式爆炸螺栓

剪切式爆炸螺栓是在其连接面处有一薄弱面，承受两级体连接，当需要分离时，起爆器起爆，产生高温高压气体，推动活塞运动，在剪切力的作用下，将薄弱处剪切掉，实现分离。剪切式爆炸螺栓结构如图 3-57 所示。

这种螺栓的特点是尺寸较小，无污染，冲击扰动小，装配容易；但由于是靠活塞剪断薄弱处实现分离，所以此螺栓的连接力较小，只能应用到对承载能力要求不是很高的装置中，抗拉断力 75kN 左右。

3) 剪切销式爆炸螺栓

剪切销式爆炸螺栓结构如图 3-58 所示。其分离面是内筒和外筒的套接面，内外筒平时靠剪切销固定在一起。当药室压力增加到切断剪切销时，两者解锁分离。

这种螺栓的特点是加工方便、装配容易，但其连接力受到剪切销强度的限制，一般适用于连接力较小的部位。典型的剪切销式解锁螺栓连接载荷为 10kN。

2. 爆炸螺母

爆炸螺母又称易碎螺母（见图 3-59），是所有分离火工装置中最简单的一种，通常利用高压气体使螺母与螺栓分离。

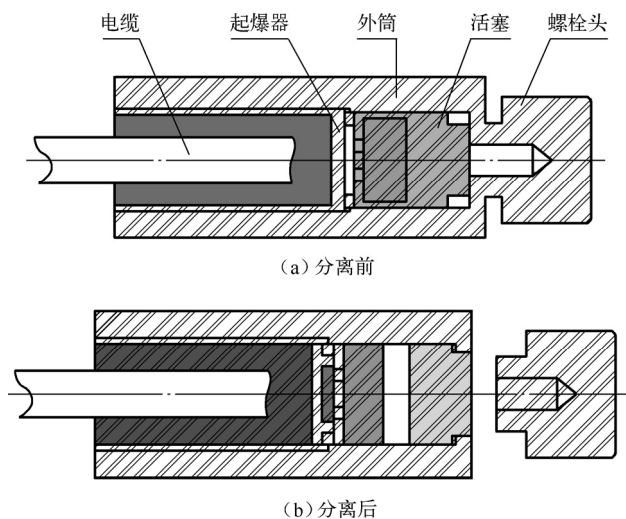


图 3-57 剪切式爆炸螺栓结构示意图

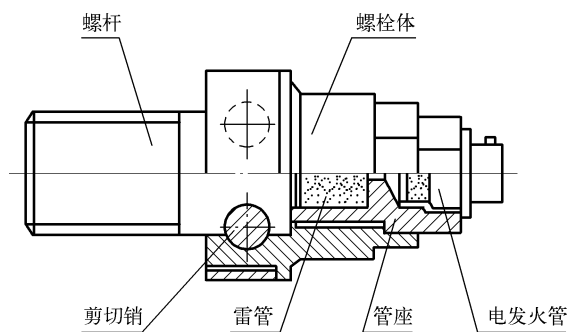
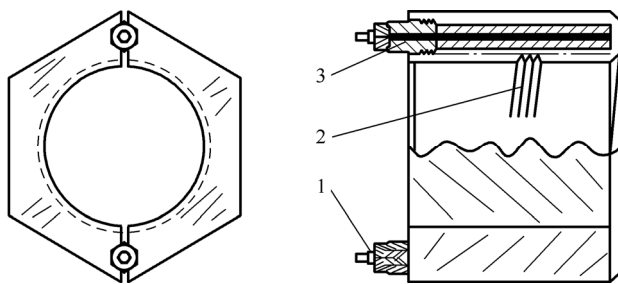


图 3-58 剪切销式爆炸螺栓结构示意图



1—雷管；2—锯齿螺纹；3—扩爆管。

图 3-59 易碎螺母结构及安装图

易碎螺母作用前后示意图如图 3-60 所示。

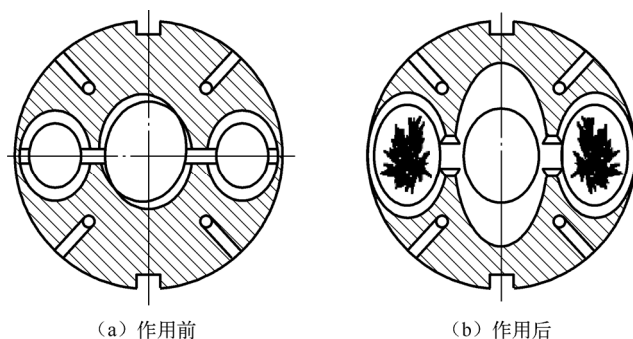


图 3-60 易碎螺母作用前后示意图

螺母中心连接的是双头螺栓。当装在易碎螺母中压力药筒的雷管发火时，其输出将使连接易碎螺母 2 个半块的临近的薄轮辐断裂，分开螺母的 2 个半块，并使对称位置的 2 个薄轮辐也因螺母半块的支轴作用而断裂，继而导致螺母中心的压紧螺栓释放。易碎螺母使用 2 个压力药筒，主要起冗余作用。

3.3.4.2 分离螺栓及螺母

分离螺栓及螺母的特点是其内部只装推进剂或烟火药，螺栓或螺母分离力并不是来源于猛炸药的爆炸或爆炸驱动，而是来源于药筒输出压力经其他介质传递后的相互作用。

1. 分离螺栓

分离螺栓是在爆炸螺栓的基础上演变而来的，结构较剪切式稍复杂，其连接功能的实现与爆炸螺栓一样。与爆炸螺栓的不同之处在于螺栓的解锁分离是通过释放卡球或卡块来实现的。它的内外筒靠剪刀销固定在一起，它在分离时产生的冲击较爆炸螺栓小得多，而且一般碎片和污染物很少，所以，它的安全性大大提高。比较典型的分离螺栓有滚珠式分离螺栓和楔块式分离螺栓等。

1) 滚珠式分离螺栓

滚珠式分离螺栓的分离面是其内筒和外筒的套接面。其工作原理是点火器点火引燃主装药，产生高温高压燃气，推动活塞剪断剪切销，使活塞离开钢球，钢球靠径向力落入空腔内，使内、外筒失去轴向连接，实现内、外筒的分离。图 3-61 为典型的滚珠式分离螺栓结构图。

这种装置的特点是起连接作用的是钢球，而分离时只需剪断很细的剪切销并克服滚珠与内外筒的摩擦力。故其连接强度大而分离力小，扰动小。与剪切销式解锁螺栓相比，滚珠式分离螺栓比较复杂，装配难度大，但连接力大，只要很小的力就能推开活塞，达到解锁目的。

另一型滚珠式分离螺栓采用弹簧代替剪切销限定活塞的移动，解锁时，活塞杆在外力作用下压缩弹簧，靠近内筒，从而使钢球落入活塞杆的凹槽中，实现分

离。其结构如图 3-62 所示。

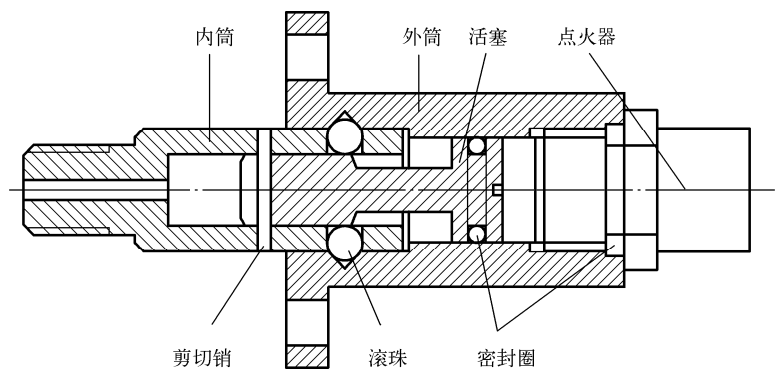


图 3-61 典型的滚珠式分离螺栓结构图

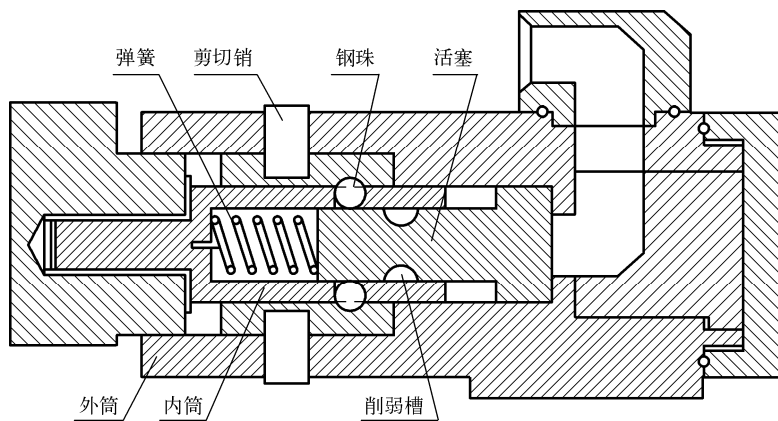


图 3-62 另一型滚珠式分离螺栓结构图

2) 楔块式分离螺栓

楔块式分离螺栓是在滚珠式分离螺栓的基础上发展起来的，其工作原理与滚珠式分离螺栓一样，主要的不同点就是用楔块替代滚珠，其结构如图 3-63 所示。

该装置最大的优点就是用楔块代替滚珠后，增大了与外筒的接触面积，从而大大增加了装置的连接力。它同样具有滚珠式解锁螺栓分离冲击小的优点。但这种装置对楔块的加工质量要求较高，楔块的加工工艺复杂。楔块解锁与钢珠解锁相比，加工和装配工艺复杂一些。

2. 分离螺母

分离螺母是自 20 世纪 60 年代发展起来的火工连接分离装置，经过不断的改进，目前使用的已经是第三代产品。分离螺母能提供非常大的连接力，连接强度优于爆炸螺栓和其他解锁分离装置；需要的爆炸启动压力小，产生的分离冲击相

对小；无污染，无碎片；容易标准化。因此，分离螺母非常适合于卫星、火箭、导弹的舱段分离、星箭分离、载荷释放等。

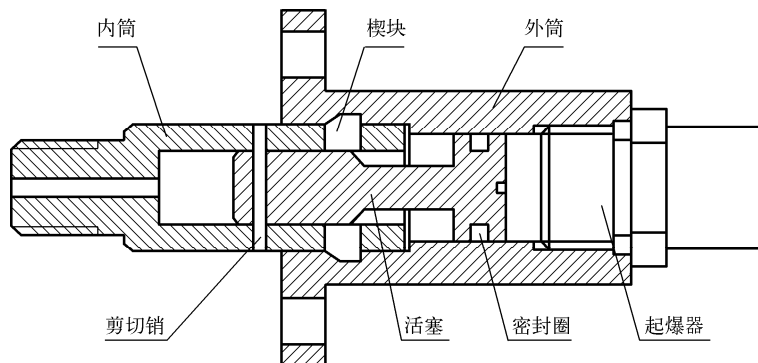


图 3-63 楔块式分离螺栓结构图

1) 全螺母连接锁

分离螺母的分离段为有内螺纹的圆柱体，并从轴向切割成几段，连接螺栓的螺纹与分离段的内螺纹啮合。分离环从外部约束分离段，使分离段与螺栓的螺纹间不会发生径向移动。在分离螺母工作时，由火药燃气驱动，分离环沿轴向移动解除约束，使分离段沿径向往外移动，从而与螺栓的螺纹脱离，释放螺栓。如若按结构形式来说主要有两种：一种是反推式，即分离环运动方向和起爆器燃气输出方向相反；另一种是直推式，即分离环运动方向和起爆器燃气输出方向相同，如图 3-64 所示。

从分离螺母的结构上看是强连接、弱解锁的形式，可以看出连接承载能力大，分离冲击较小，但整体看结构较复杂，尺寸较大，加工、装配难度大。

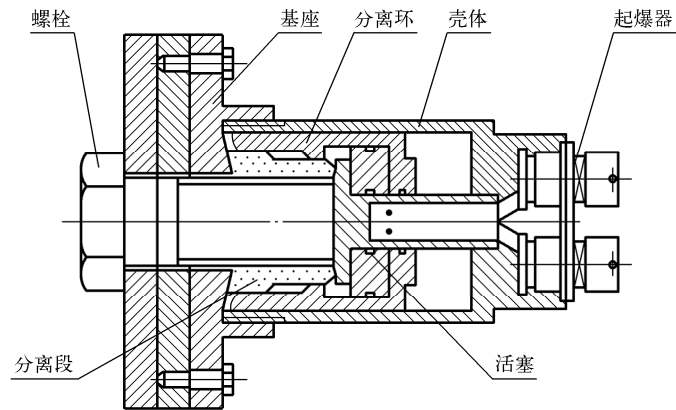
2) 半螺母连接锁

半螺母连接锁的结构如图 3-64 所示。它主要由燃烧室、活塞、锁块、齿环、连接螺栓、螺套等组成。当两个目标体处于连接状态时，两个半圆形的锁块（半螺母）靠螺纹啮合副夹紧齿环，连接螺栓的一端固定在齿环内，另一端的螺纹部分旋入连接体 2 内的螺套，这样，就实现两个物体的连接。

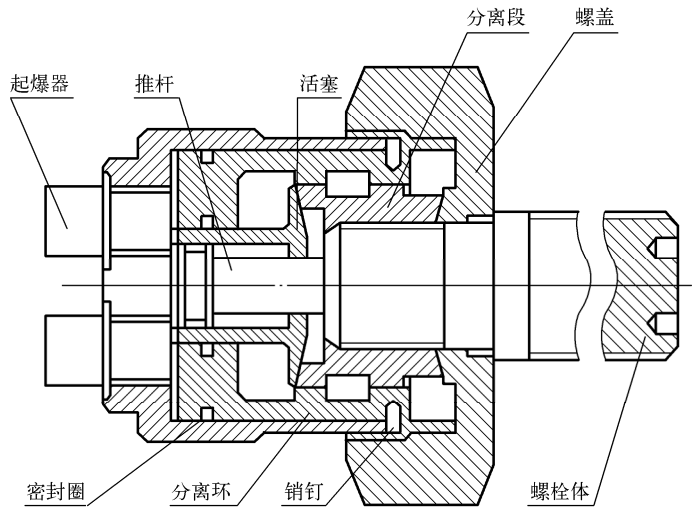
当两个连接体解锁时，燃烧室内产生的高压燃气推动活塞运动到一定位置后，锁块失去径向约束，在锁块与齿环之间螺纹副相对压力的作用下，锁块沿径向移动，锁块与齿环之间螺纹副脱离啮合，齿环的轴向约束解除，从而实现两个连接物体的解锁。

半螺母连接具有承载能力大、冲击大、解锁可靠性高的优点。这种锁通过锁块和齿环上的螺纹把部分轴向连接荷载，转化成径向载荷，从而大大提高了其承受轴向载荷的能力，其连接载荷可达 200kN。解锁时高压燃气产生的解锁力与连接载荷不在同一轴线上，因而解锁冲击较小，同时，在活塞的底部还备有缓冲垫，

可以进一步降低解锁时的冲击。两个半螺母式锁块中的一个与齿环之间的螺纹副脱离啮合，就可以实现解锁，其解锁可靠性大大提高。另外，在两个锁块上还有径向拉力弹簧，一旦螺纹内啮合卸载，在径向拉力弹簧的作用下，可以使锁块与齿环彻底分离，进一步提高解锁可靠性。



(a) 反推式分离螺母



(b) 直推式分离螺母

图 3-64 分离螺母结构图

这种锁的缺点是：结构复杂，加工难度大，安装操作的要求较高，连接面的空间尺寸大，适合用于航天器舱段之间的连接。

3.3.5 线型分离火工装置

另一种常用的分离是采用切割索进行分离。切割索预埋在分离面内的削弱槽中，当切割索接到工作指令后，由起爆器点火引燃主装药，产生高温高压气

体，将削弱槽炸断，形成分离面，达到导弹两级分离的目的。与多点式分离相比，线型分离具有工作可靠、安全性高、同步性好、电能消耗低、勤务处理方便等特点。

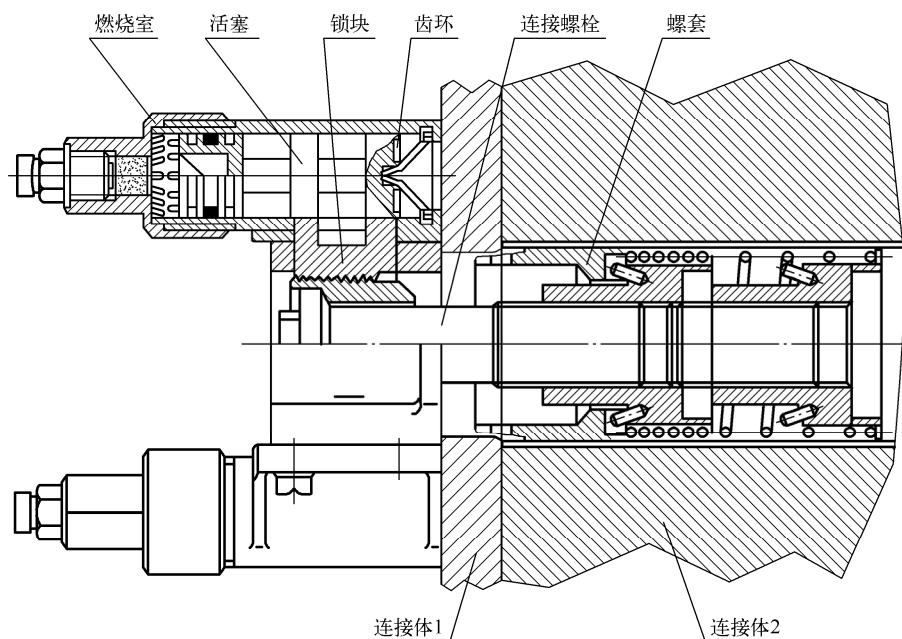


图 3-65 半螺母连接锁结构图

线型分离装置主要有聚能切割索分离、气囊式炸药索分离及膨胀管分离等几类。切割索分离利用切割索爆炸后的聚能射流直接将分离面切开达到分离的目的，具有能量大、能切割多种结构及材料等特点，适应于承载能力较大、结构厚度较厚的切断与分离，是应用较早、较广泛的线型分离装置。但是，由于切割索在工作时，产生大量烟雾，对弹头的污染较大，且连接力大的削弱槽式切割索分离时分离冲量也较大，分离过程中对弹体造成很大冲击。后两者利用金属管内导爆索及填充物的膨胀效应将分离板撑破断裂，或通过气囊膨胀做功实现分离，具有无污染、冲击过载小等特点，适用于弹内装有高精密仪器设备、光学仪器的舱段和整流罩的分离，是一种新型的线型分离装置。

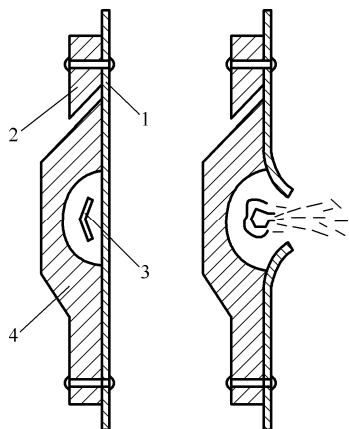
3.3.5.1 聚能切割索

聚能切割索是一种内装炸药的细长金属软管，使用时将它沿分离面安装在截面为 U 形的压环内，如图 3-66 所示。分离时，通过炸药定向爆炸与 U 形压环相对应的分离区，切断壳体蒙皮，使两分离体解锁。

聚能切割索的优点是分离部位结构不必预制机械分离面，因而连接结构刚度易保证，分离迅速，分离同步性好，可靠性高，结构质量也较小。但同时它也有

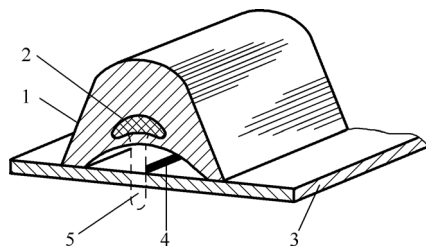
较明显的缺点，即爆炸后产生较大的冲击载荷，爆炸气体烟雾对环境有污染。

聚能切割索是内装有猛炸药的金屬管被拉制成截面呈 V 形的细长索条。其作用原理是：当起爆器起爆聚能切割索后，管内的炸药爆炸，因聚能穿甲效应而形成一股由高温高压气体和金属气化后的气体所组成的射流，对一定厚度的金属板进行切割（图 3-67）。



1—分离区壳体；2—搭接环；3—聚能切割索；4—支承环。

图 3-66 聚能炸药索解锁装置

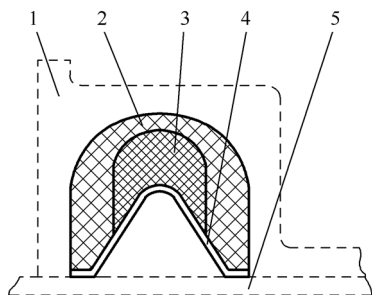


1—金属保护罩；2—猛炸药；3—被切割结构；

4—断裂线；5—爆炸射流。

图 3-67 聚能切割索作用原理

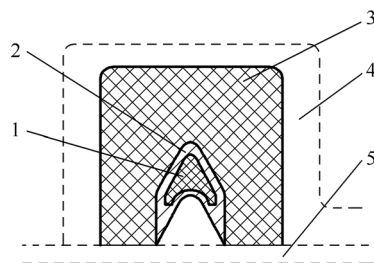
聚能切割索有药条式聚能切割索和金属管聚能切割索两种基本结构。药条式聚能切割索（图 3-68）是由黑索金炸药配以辅助成分压制成药条，药条外加一个由硅青铜条压制而成的金属聚能罩。金属管聚能切割索（图 3-69）是将纯黑索金或六硝基芪炸药装在铅、铅铋、银、铜等管内，用模具多次压制而成。聚能切割索所能切割金属的厚度是由炸药的威力、装药量、聚能角、炸高（切割索离金属表面的距离）等因素决定的。在两种基本结构中，金属管聚能切割索切割效果更好些。



1—金属保护罩；2—橡胶保护套；

3—药条；4—聚能罩；5—被切割结构。

图 3-68 药条式聚能切割索



1—装药；2—铅管；3—橡胶保护罩；

4—金属保护罩；5—被切割结构。

图 3-69 金属管聚能切割索

3.3.5.2 气囊式炸药索

气囊式炸药索的炸药的外面有两个偏心或同心的不锈钢管套接在一起，钢管上钻有排气孔，管子外面再套上可以折叠的气囊。炸药索被引爆后，大量高温高压气体经内外钢管的排气孔两次降温降压以后进入气囊。气囊膨胀做功，推动活塞移动，进而切断铆钉，实现舱段解锁与分离，如图 3-70 所示。

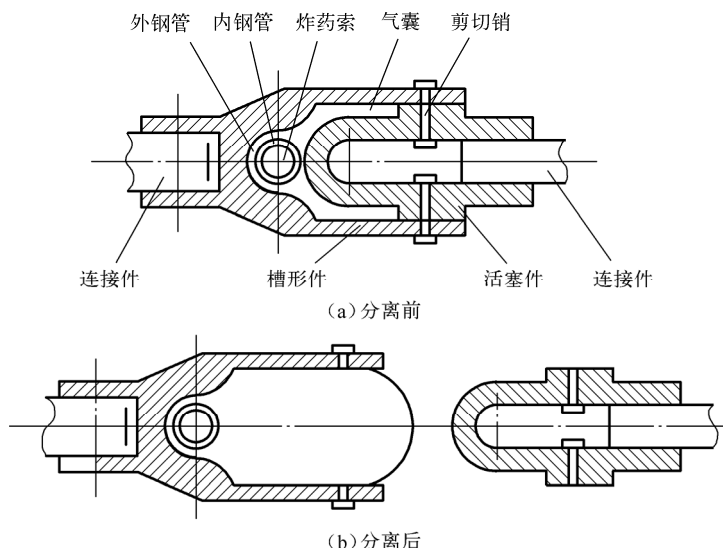


图 3-70 气囊式炸药索解锁机构

气囊式炸药索的气囊中装有两根不锈钢管（外缓冲钢管、内缓冲钢管），能有效地衰减爆轰波，从而实现了低冲击、无污染的分离，具有较好的应用前景，但是对接接头的几何尺寸、导爆索的药量、衰减管的直径和厚度、排气孔的数量和大小、气囊的尺寸及铆钉的数量、材料等结构要素十分复杂。

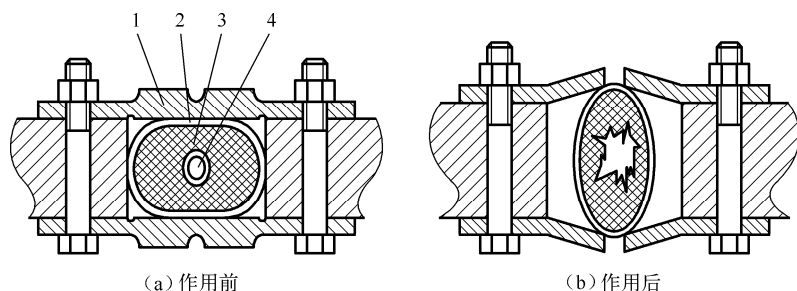
3.3.5.3 膨胀管

膨胀管也称封闭炸药索、无污染炸药索。膨胀管分离装置的结构新颖、合理。其特点是：系统工作时，不是将导爆索的爆炸能量直接作用于分离连接件上，而转换为气体做功的形式解锁、分离；膨胀管外壳为椭圆的不锈钢管，内装导爆索（其间有填充物），导爆索引爆后，使椭圆管变形为圆管，在开有削弱槽的地方将分离对象胀破，从而达到分离目的。

1. 结构组成

膨胀管一般由导爆索、填充物、金属管、分离板组成。导爆索是整个分离装置的能量源，其装药量（线密度）则根据分离载荷和金属管不破裂的承载能力来决定。填充物是导爆索爆炸时吸收冲击能量、减少自由容积的物质，同时也能在

储存、运输过程中起到支撑、保护导爆索的作用。金属管在作用前包容填充物和导爆索，作用时能膨胀变形，并在作用后将爆炸产物密封，其规格根据结构尺寸和分离板连接强度决定。分离板作为系统的分离对象，在作用前连成一体，而作用后断裂分离。其结构形式为带削弱槽板连接方式，分离板的具体结构和形状尺寸由分离载荷和使用情况决定。膨胀管分离装置如图 3-71 所示。



1—分离板；2—金属管；3—填充物；4—导爆索。

图 3-71 膨胀管分离装置

膨胀管在导弹上的安装结构如图 3-72 所示。

2. 基本工作过程

引爆索爆炸后，其爆炸冲击能量大多被填充物所吸收，并迅速气化成气体，这样爆炸产生的气体和填充物气化的气体很快在金属管内部形成高压状态，对平椭圆形的金属管做功，使其膨胀变形。当金属管内部气体的压力足以克服金属管的变形力及分离板的破坏力时，分离板在削弱槽处断裂分离。只要导爆索的装药量及分离板的连接力选择适当，就能保证在分离板分离的同时而金属管不破裂，使爆炸产物和填充物气化气体不泄漏，从而达到无污染、无碎片的要求。整个作用过程受力均匀，受冲击载荷低，且爆炸产物始终密封于金属管内，具有线型分离装置的优点，又达到了低冲击、无污染的目的，所以，可以应用于航天器内要求高度清洁、低冲击的地方。

3. 组件选择

(1) 导爆索选择。选择导爆索外壳材料的标准是容易气化，作用后不留碎渣，目前适合的材料主要是铅金属。

(2) 金属管选择。为保证分离时金属管不破裂，金属管材料应有足够的刚性和韧性，目前大多使用不锈钢管。可使用直径为 $\phi 14 \sim \phi 20 \text{mm}$ ，可将管壁厚为 1mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管挤压成一定长短轴比的椭圆形管。

(3) 填充物选择。填充物的作用是支撑保护导爆索并吸收导爆索爆炸的冲击能量。目前大多用硅橡胶类或聚乙烯塑料等塑性好的材料作填充物。

(4) 分离板选择。分离板应选择强度较高、质量较轻的铝合金材料，削弱槽

处为分离面。

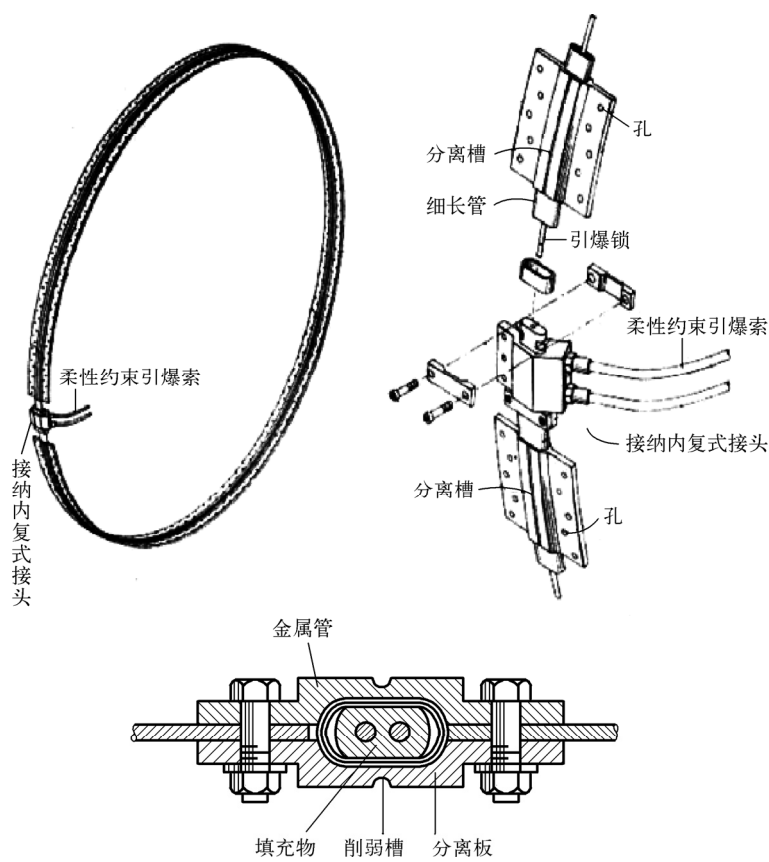


图 3-72 膨胀管在导弹上的安装结构图

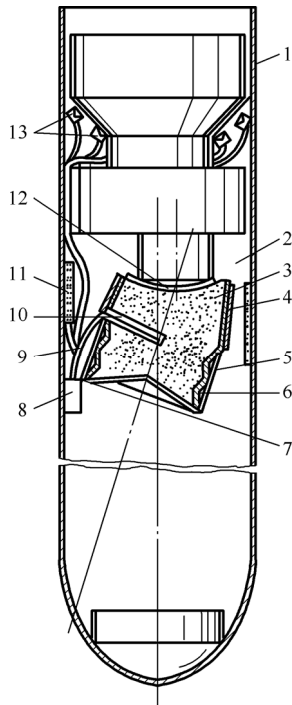
3.4 索类火工品

索类火工品是具有连续细长装药的柔性火工品的总称，具有传火、传爆及延期等功能。导弹武器系统所使用的索类火工品主要包括导火索、导爆索及延期索等。以英国的“阿拉姆”导弹战斗部为例，战斗部由圆柱段和截锥段组成，如图 3-73 所示。战斗部具有多种破坏作用：圆柱段有径向作用的大锥角聚能装药，形成的射弹可以有效地破坏雷达车的履带结构。截锥段有球形预制破片，用于破坏雷达的非装甲结构，如天线结构。圆柱段前端的径向大锥角聚能装药形成的射弹可以破坏目标的重型装甲。截锥段端部的轴向球冠聚能装药用于使对面的导弹结构解体。围绕截锥段安装在导弹壳体上的辅助炸药用于在战斗部爆炸时破坏导弹壳体，清除球形预制破片的飞行道路。切割自毁装药，用于使导弹上的较大结

构解体。引爆能量是通用导爆索传递至起爆管的。

3.4.1 导火索

导火索是传递火焰的火工品，它以黑火药为药芯，药芯外面包缠有柔软坚韧具有防潮能力的外皮。导火索的作用是传火和延期。例如，引信中利用导火索将火帽的火焰传到雷管中，并保证火帽发火到雷管引爆之间有一定的延期时间。



1—导弹；2—战斗部；3—炸药；4—截锥段；5—圆柱段；6—径向大锥角聚能装药；7—轴向大锥角聚能装药；8—引爆装置；9—导爆索；10—起爆管；11—辅助炸药；12—轴向球冠聚能罩聚能装药；13—切割自毁装药。

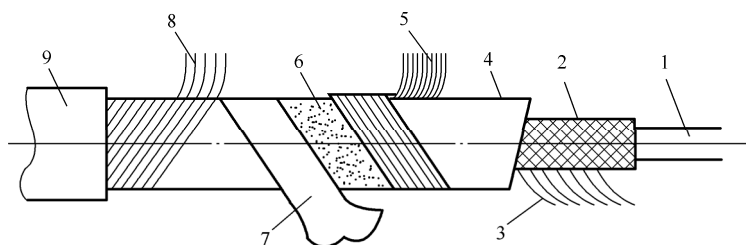
图 3-73 “阿拉姆”导弹战斗部

对导火索的主要战术技术要求：

- (1) 有较好的火焰感度和足够的点火能力（喷火性能）。
 - (2) 有均匀的燃烧速度。燃烧时不得有中途熄灭、断火、透火、外壳燃烧等现象。
 - (3) 满足一定的规格尺寸要求。为了和其他火工品（如火雷管）配合使用，导火索外径一般为 5.3~5.9mm，即比火雷管的内径尺寸稍小些。
 - (4) 防潮性能良好，可在一般潮湿环境中使用。
- 导火索在其他方面的要求，与一般火工品类似。

3.4.1.1 结构

导火索以黑火药粉（粒）为药芯，以棉线、导火索纸等作包缠物，以沥青作防潮剂而制成。为了加强导火索的防潮性能，可以在纸层中再加一层防潮脂或塑料。导火索的结构如图 3-74 所示。



1—芯线；2—药芯；3—内层线；4—内层纸；5—中层线；

6—防潮层；7—中层纸；8—外层线；9—外层涂料。

图 3-74 导火索的结构

1. 主要材料

1) 药芯

黑药导火索中使用的黑药成分为硝酸钾 60%~78%，硫 10%~30%，木炭 10%~20%。药芯直径为 2.2mm，药芯为粉状或小粒黑火药，每米长度药量为 6g 左右，中间通过两根或一根棉线，也可以用人造纤维。

2) 芯线

导火索用的线多为棉纱加工而成，其作用是导引黑火药下料。为防止黑药受潮，降低燃速，在使用前必须进行烘干处理。芯线多为四根，如 18×4 或 28×4 并股棉线。

3) 内、中、外层纸

其作用均为包缠，内、外层纸通常为 28mm 直裹纸条。中层纸和中层线的缠绕方向与内层纸和内层线的缠绕方向相反。导火索专用纸有导火索纸和水泥袋纸两种。要求纸紧密性好，耐折，不易撕裂。

4) 沥青

用于防潮层。沥青用 30 号甲、30 号乙皆可，30 号甲软化点较高（70℃），适于在我国南方地区使用；30 号乙软化点较低（60℃），适于在我国北方地区使用。使用前需要进行熬制清除杂质并提纯。

5) 涂料

最外层纸条黏结时所用的涂料应有良好的黏结性，并对产品性能没有不良影响，多采用聚乙烯醇的水溶液。这种胶具有黏结性好、干燥快、操作方便等特点。

2. 主要工序

(1) 药芯线与药芯混杂在一起，在制索时起引导黑药粉往下流的作用。

(2) 内层线将黑火药包成索状，内层纸的作用是防止内包层的松懈，同时进一步将药芯包缠紧固，增加药芯的密度。

(3) 中层线与内层纸的缠绕方向相反。中层纸外涂沥青层，用于防潮、防透火，并将中层线黏结在一起，防止松动。同时，沥青层与中层纸紧密黏结，使导火索得到加固。

(4) 纸层外有外层线，作用是缠紧纸条层。最外层为黏性涂料层，可将外层棉线与纸条紧密地黏结在一起，防止在切断导火索时散开。

(5) 最外层的涂料为白色，以区别于导爆索。药芯的各层纤维包缠物可用棉线、亚麻、人造纤维等制作，我国多采用棉线。

3.4.1.2 燃速及影响因素

1. 燃速

根据不同的燃速，导火索可分为速燃导火索和缓燃导火索两种。速燃导火索的燃速在 100s/m 以下，缓燃导火索的燃速在 100s/m 以上。缓燃导火索又分为普通缓燃导火索（燃速 100~200s/m）和高秒导火索（燃速在 200s/m 以上）两类。一般工业导火索常用燃速为 100~125s/m。

2. 燃速影响因素

导火索的燃速最能体现质量问题，燃速不正常的现象包括燃速不合格、熄灭、断火及爆燃等现象。造成燃速不正常的因素很多，一般可以从三个方面考虑。

1) 黑药的质量

(1) 黑药配比与原料细度。

药粉细度增加，比表面增加，燃烧时燃烧面积增加，所以燃速增加，即每米燃烧时间缩短。在可燃剂中，木炭的成分增加，硫的成分减少，燃烧速度增快。因为木炭的质地较松，有较大的燃烧表面使燃速增加，而硫有黏合剂的作用，硫增加时会堵塞木炭中的小孔，使燃烧困难。黑火药成分配比和细度对燃速的影响见表 3-10。

表 3-10 黑火药成分配比和细度对燃速的影响

序 号	黑火药成分质量分数/%			药粉细度	燃速/(s/m)	燃烧情况
	KNO ₃	S	C			
1	64	26	10	60 目筛全通过	108~114	正常
2	64	26	10	药芯中有铜丝	102~108	有透火
3	65	17	18	100 目筛全通过	90~94	透火较多

(续)

序 号	黑火药成分质量分数/%			药粉细度	燃速/(s/m)	燃烧情况
	KNO ₃	S	C			
4	65	17	18	120 目筛全通过	60~62	速燃
5	65	16	19	100 目筛全通过	92~94	—
6	65	16	19	120 目筛全通过	60~71	速燃
7	65	15	20	100 目筛全通过	72~74	—
8	65	15	20	120 目筛全通过	60~68	速燃

研究表明,由硝酸钾、硫磺、木炭组成的黑火药的燃速随碳质量分数的变化,近似地呈不规则的抛物线形,且以木炭质量分数为 15%左右时为最大燃速点。

(2) 原材料质量。

原材料的质量对燃速有影响。黑火药中所用的硝酸钾是一级纯的,不纯的硝酸钾中含有氯化物,容易吸潮,使燃速发生变化。硫中的杂质主要是砷,燃烧生成的氧化砷(砒霜)是剧毒物质。影响燃速的一个重要的因素是木炭,包括所用木材的种类(一般是阔叶树)、年龄、采伐季节、炭化情况及杂质多少等,在选择时要严格控制。

(3) 原材料中的水分。

导火索易受到原材料内在水分及空气中外在水分的影响。黑火药中水分含量对燃速的影响见表 3-11。

表 3-11 黑火药中水分含量对燃速的影响

序 号	水质量分数/%	燃速/(s/m)
1	0.205	79.7
2	0.270	76.7
3	0.446	72.4
4	0.900	66.9
5	1.81	110~115
6	3.35	115~125
7	6.67	135~155 (有断火出现)

由数据可知,在一定的范围内,黑火药的水分质量分数越高,制成的导火索的燃烧速度越快;当黑火药的水分质量分数超过 1.5%~2.0%时,导火索的燃烧速度即渐渐变慢;增大至 5%左右时燃烧速度显著变慢,有时甚至产生断火等现象。

现象的主要原因是水分在导火索燃烧时将变成蒸汽,而水变成蒸汽是吸热过程(1mol 100℃的水变成同温度的蒸汽时,需吸收 40.6kJ 的热量,在极高的温度(2000℃)时,还有百分之几的水产生离解)。当水分质量分数在 1.50%~2.0%以下

时，燃烧时水分变成蒸汽，使导火索燃烧内压升高，但还没有达到影响燃烧的反应速度，所以其燃烧速度随蒸汽压的增加而变快；但当黑火药的水分质量分数超过 1.5%~2.0%时，水分蒸发吸收的热已足以影响燃烧反应的速度，所以燃烧速度随着含水量的增加而逐渐变慢；当水分质量分数增大至 5%左右时，由于水分的蒸发吸收的热量多，所以有可能使反应不能继续维持下去，因而有时产生断火现象。

2) 工艺影响

(1) 装药密度。

如果导火索药芯密度过小，即黑火药比较疏松，通常会出现气孔多、火焰感度高（容易点火）、燃烧速度快、燃烧性能不够稳定等现象；如果药芯密度过大，即黑火药比较密实，通常会出现气孔相对减少、火焰感度低（难点火）、燃烧速度慢等现象。导火索药芯的装药密度取决于药嘴直径、黑火药的规程密度、内层线钢模直径、芯线和内层线的规格、制索机齿轮的传动及制索的工艺情况。

(2) 包缠密度。

包缠材料的包缠密度对导火索的质量影响也较大，但内外层的影响程度是不相同的。

当轮转速较快时，导火索被牵引得快，药芯密度就减小，同时包缠材料的包缠密度也普遍变小。内层线产生变化时，其导火索的燃烧速度是按药芯密度的变化规律而变化的。外层沥青对导火索质量的影响情况则不同，当沥青层越厚时，对导火索燃烧的气体产物阻力越大。所形成的内压越高，则导火索燃速越快；沥青层越薄，对导火索燃烧的气体产物阻力越小，排气容易，内压相对降低，则导火索燃速减慢。

3) 使用条件

(1) 环境温湿度。

导火索在常压、低温条件下的燃烧速度的变化：当温度越低时，燃烧速度越慢。合格的导火索如果因储存不好而吸潮，会发生火焰感度下降甚至断火现象，外壳有损伤时，会加剧吸潮性能。

(2) 压力。

压力对导火索性能的影响包括环境大气压力和导火索燃烧时生成的气体压力，还有一种机械外力所施加的压力。压力对导火索性能的影响规律是一致的，即压力越高，导火索的燃烧速度越快；压力越低，导火索的燃烧速度越慢。

3.4.2 导爆索

3.4.2.1 概述

导爆索是一种以猛炸药为药芯，用来传递爆轰波的索状火工品。自从 1879 年出现导爆索以来，已经有 100 多年的历史了。随着炸药及爆破技术的不断发展，

导爆索得到了不断的改进和发展。18 世纪末到 19 世纪初首先出现了以金属为壳体、硝化棉为药芯的导爆索，用于采矿业。以后，由于军事上的需要，1904 年出现了铅壳梯恩梯药芯导爆索，1906 年制出了锡壳—苦味酸药芯导爆索，1919 年新型的猛炸药太安和黑索金被用于制造导爆索，由于这两种猛炸药的爆速高，感度好，所以导爆索的性能得到很大的改善。

20 世纪 50 年代，由于航空、空间武器发展的需要，以挠性金属为外壳，各种猛炸药为药芯，直径较小的导爆索开始问世，这种导爆索称为柔性导爆索或低能导爆索。60 年代以后，由于国防航天技术的迅猛发展，常规装药已不能满足高空遇到的高温、低压环境要求，于是金属管导爆索装填耐热炸药的新结构产生了，并广泛用于导弹、火箭、宇宙飞船及各种武器系统。70 年代，继金属管导爆索之后，又出现了切割索（LSC）、延期索等，以满足不同的需要。目前，广泛用于武器系统的新型小直径导爆索主要有柔性导爆索（MDF）、限制性导爆索（CDF）、铠装式柔爆索（或屏蔽式导爆索，CMDC）和切割索（LSC）四种类型，主要应用于导弹的爆轰传递、延时控制、级间分离等特定任务。

柔性导爆索（MDF）又称金属管导爆索，其被覆层为金属，并具有良好的柔性。

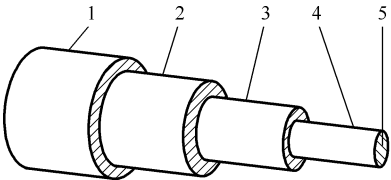
限制性导爆索（CDF）是在小药量柔性导爆索的外面再包覆多层材料，传递爆轰时，这些包覆层能将爆轰产物及碎片封闭在金属壳内而不损坏相邻零部件，具有无污染性，所以限制性导爆索又称无污染导爆索。

屏蔽导爆索（CMDC）是在小药量柔性导爆索的外面包覆一层不锈钢管，不锈钢管与导爆索金属壳之间填充聚四氟乙烯塑料，以保持导爆索居中。为增加塑性，不锈钢管要经过退火处理，所以，屏蔽导爆索又称为刚性爆炸传输线，主要用于高温环境。

切割索（LSC）则是以挠性金属为外壳，内装以猛炸药，并以聚能爆破的形式完成切割功能。

3.4.2.2 限制性导爆索

限制性导爆索（CDF）核心是小药量柔性导爆索，外面包覆一层内层材料（多用聚乙烯塑料）和多层编织玻璃纤维，有的最外层还编有一层不锈钢丝，结构如图 3-75 所示。限制性导爆索是最为常用的导弹火工系统传输元件。



1—第 2 层编织玻璃纤维；2—第 1 层编织玻璃纤维；3—聚乙烯；4—铅壳；5—黑索金混合炸药。

图 3-75 限制性导爆索结构

1. 壳体

导弹武器中使用的金属壳导爆索是由炸药和金属外壳组成的爆炸元件。柔性金属导爆索的外壳材料一般都是延展性好、退火温度较低的有色金属或合金，如铜、锡、铅、银、铝、铅锡合金等，目前我国生产的柔性金属壳导爆索多用铅和银作为外壳材料。

2. 装药

普通的导爆索装药常用太安（PETN）、黑索金（RDX）、奥克托金（HMX）等。在导弹武器系统中，为了保证导爆索组件具有高的安全可靠性能，考虑采用较为钝感的猛炸药来提高其安全性。六硝基芪（HNS-I）炸药熔点约为 318℃，结晶密度达 1.73g/cm³，在-193~225℃范围内均能可靠地起爆，其机械感度高，耐热性好，特别适用于高温作战环境条件。HNS 炸药与 PETN 的安全性能数据比较如表 3-12 所示。

表 3-12 HNS 炸药与 PETN 的安全性能数据比较

类型	5s 爆 发点 /℃	5min 爆发 点/℃	撞击感 度（2kg 落高） /cm	冲击 感度 /%	摩擦 感度 /%	临界起爆能量		临界起爆压力		热安 定性
						密度 /（g·cm ⁻³ ）	能量 /（J·cm ⁻³ ）	密度 /（g·cm ⁻³ ）	压强 /GPa	
PETN	225	205	17	66	92	1.6	14	1.60	4.37	150℃半 分解期 157min
HNS	350	320	47~63	40	36	1.6	37	1.60	8.0	310℃无

从表 3-12 的数据可以看出：与 PETN 相比，HNS 具有较好的耐热性能，较小的冲击波感度，较低的机械感度，故采用 HNS 装药可以大大提高导爆索组件的耐热性能，提高其安全性。

3. 包覆

包覆设计一般采用试验方法进行。先将外径为 1.0mm 的柔性导爆索包覆一层聚乙烯塑料，然后逐层编织。在不同编织层数时进行引爆试验，直到爆炸产物被完全包住为止，如对柔性导爆索逐层编织包覆到外径为 6mm 时，导爆索爆炸后无爆炸气体、爆炸残渣等爆炸产物溢出，且聚乙烯层未损坏。这种限制性柔性导爆索无污染，完全符合航天火工系统使用的要求。有试验数据表明，外径为 1.0mm 的 Ag/HNS-II 导爆索用 E 型玻璃纤维编织到 16 层时，就达到了限制性导爆索的要求，且质量轻。

3.4.2.3 延期导爆索

在导弹武器系统中，根据导爆索装药的不同，调节导爆索的爆速和长度，实现一定时间的延期传爆，多应用于串联战斗部及导弹自毁装置中。例如，德国专利介绍了一种对串联战斗部进行延迟控制起爆的方法，即利用延期药来实

现时间的延迟。法国对其进行了改进，用柔爆索代替延期药，通过改变柔爆索的缠绕长度来控制起爆的时间间隔。由于所用的柔爆索直径小，在战斗部中所占的体积也非常小，当采用适当的输出结构后，不仅可以缩小战斗部的重量和体积，节省了资金，而且把双引信改为单引信，大大简化了战斗部的结构，提高了安全性和可靠性。

小药量导爆索爆速低，能够实现微秒级的延期传爆，将其同传爆药相结合能更有效地增加导弹武器装置的安全性和可靠性。

1. 药剂选择

导爆索在小直径下能够稳定传递爆轰波，并具备爆轰速度低、爆炸能量低、一定延时的作用，导爆索药芯药剂的选择比较关键。在相同装药条件下不同单质炸药的临界直径分别如表 3-13 所示。

表 3-13 常用单质炸药的临界直径

炸 药 名 称	装药密度/(g·cm ⁻³)	粒度/mm	临界直径/mm
叠氮化铅	0.9~1.0	0.05~0.20	0.01~0.02
太安	0.9~1.0	0.05~0.20	1.00~1.50
黑索金	0.9~1.0	0.05~0.20	1.00~1.50
苦味酸	0.9~1.0	0.05~0.20	6.00
梯恩梯	0.9~1.0	0.05~0.20	8.00~10.00

由表 3-13 可知，叠氮化铅、太安、黑索金炸药的临界直径都较小，但叠氮化铅的冲击、摩擦感度很高；太安、黑索金的爆速很高；一般的混合炸药其临界直径较大，因此，从现成的炸药难以达到设计要求。根据炸药理论的基本观点，选择感度适中的黑索金作为导爆索药芯药剂的基本成分，适当地添加一些钝感添加剂，既能维持导爆索药芯药剂的稳定爆轰，又能降低其爆速。

试验分别选择了以非金属粉末（P）、高分子粉末（PS）、无机盐粉末（XB）、金属氧化物粉末（SQ）作为添加剂，制成金属导爆索，添加剂能有效地降低导爆索的爆速。以非金属粉末（P）、高分子粉末（PS）作为添加剂制成的金属导爆索不能实现小直径、低爆速。对于以无机盐粉末（XB）、金属氧化物粉末（SQ）作为添加剂所制成的金属导爆索，在较小的直径下都具有较低的传爆速度，都可以作为导爆索药芯药剂的添加剂，但从降低爆速效果来看，含有金属氧化物粉末（SQ）添加剂所制成的金属导爆索具有更小的传爆直径和更低的传爆速度。所以，选择 65%的金属氧化物粉末（SQ）为添加剂，以黑索金为基本成分作为导爆索药芯药剂。

为了减少导爆索的爆炸能量，防止导爆索爆炸后对弹药其余部分的破坏，在满足稳定传爆的情况下，应尽量选择小直径的导爆索，直径为 0.85mm，其实际药

芯直径在 0.45mm 左右。

2. 装药条件的选择

在确定导爆索药剂和导爆索直径之后，导爆索药剂的装药密度、药剂的粒度、药剂的混合均匀性等装药条件会影响导爆索的质量。为了研究导爆索药剂的装药密度对导爆索爆速的影响程度，在相同的药剂配方下，采用不同的装填密度制索后测定其表征密度。导爆索药芯密度对爆速影响的试验结果如表 3-14 所示。由表 3-14 可知，导爆索药芯密度对爆速影响很大。因此，在导爆索爆速的调节方法上，除了从药芯药剂的配方上考虑外，在一定的范围内调整药芯的装填密度不失为一种简单而易行的方法。在确定好导爆索的装药以后，通过药剂造粒，既可以使装药密度下降又可以保证装药均匀。药剂造粒后导爆索的装药量明显下降，在导爆索外径相同的情况下，说明装药密度有所下降，因而爆速也有所下降，并且传爆药添加物比例越大，密度降低造成的导爆索爆速下降越明显。

表 3-14 导爆索药芯密度对爆速的影响

药芯密度/ (g·cm ⁻³)	外径/mm	内径/mm	爆速/ (m·s ⁻¹)
1.25	3.24	2.6	2111
1.65	3.42	2.5	2608
1.95	3.42	2.5	2942
2.19	3.42	2.4	3572
2.61	3.42	2.3	3972

此外，选择合适的炸药粒度对于低爆速、小直径的金属导爆索意义较大。因为炸药的爆轰感度和临界直径与药剂的粒度均有关系。在相同的药剂配方下，粒度太大，传爆有困难，粒度越小炸药的比表面积越大，反应速度越快、爆速越高。

3. 软化处理

导爆索软化处理实际上就是去应力处理。因为导爆索在拉制过程中会产生冷作硬化现象，软化处理后可以消除残存应力，导爆索明显变软。软化处理后，导爆索的爆速会发生变化，试验结果如表 3-15 所示。

表 3-15 软化处理前后爆速对比试验结果

主要添加物 比例/%	装药状态	装药量/ (g·m ⁻¹)	软化前直径 /mm	软化后直径 /mm	软化前爆速/ (m·s ⁻¹)	软化后爆速/ (m·s ⁻¹)
0	未造粒	0.36	1.01	1.01	7026	6997
25	未造粒	0.72	1.01	1.01	5921	5971
25	造粒	0.53	1.01	1.02	5859	5745

从表 3-15 可以看出，导爆索内装填未造粒药剂时软化处理前后爆速变化不大；装填造粒药剂时（造粒用黏合剂必须耐温），软化处理后爆速明显下降。分析爆速下降的原因，认为是装药经过造粒后，颗粒变大，装药时管内残留有一定的空气，在拉制过程中不能被完全排出，软化处理时空气会膨胀，使导爆索的直径变大，造成装药密度相对降低，故爆速有所下降。

综上所述，采用这种较低传爆速度的金属导爆索，可根据需要通过药剂、装药条件、软化处理及长度的选择等手段，以得到从几微秒到几百微秒甚至上千微秒的延期时间，满足导弹装备短延时需要。

3.4.2.4 导爆索性能主要影响因素

1. 炸药的影响

炸药本身的性能和粒度是影响柔性导爆索性能的主要因素。

导爆索的爆速及耐温性能均取决于炸药本身的性能，粒度越细，完全反应所需要的时间越短，其极限直径和临界直径也小，爆轰感度越高，爆速越大，但是炸药过细会使炸药的流散性变差。在炸药中掺入无机物或钝化剂可以改善炸药的装药性能和流散性，但是，炸药的起爆感和爆速降低。

2. 装药密度和药量的影响

在炸药的种类选定后，装药密度与炸药的爆速有对应的关系。炸药密度越大，爆速越高，起爆能力也随之提高。在导爆索爆速一定的情况下，增加装药量、加大药芯直径，导爆索的起爆能力增大。

3. 金属管材料的影响

导爆索的外壳金属材料对导爆索的性能及生产工艺有较大的影响。金属管成分、壁厚的均匀性及与装药的相容性均会影响柔性导爆索的性能。

4. 其他影响因素

导爆索存放的温度、储存的时间、使用条件等因素均对导爆索的感度与起爆能力都会产生影响。

本章小结

本章着重对点火类火工品、起爆类火工品、做功类火工品、索类火工品等火工品进行介绍。重点描述了各类火工品的功用、结构、组成及工作原理，并结合实例介绍了各型火工品在装备上的应用特点，以及影响其性能的各种因素。

本章内容是学习导弹火工品的重要基础，全面深入地理解本章内容，对掌握导弹火工装备有着非常重要的作用和意义。

思考题

1. 总结导弹点火类火工品的种类及特点。
2. 试说明传爆药和导引传爆药的异同点。
3. 爆炸螺栓的工作机理有哪些？
4. 影响导火索燃速的因素有哪些？
5. 试述隔板点火器的工作原理。

第 4 章 新型火工品技术

随着现代半导体微电子技术、激光技术及新材料、新工艺的发展，火工品技术也有了长足的进步。通过学科交叉融合及新型起爆技术的应用，出现了许多有异于常规火工品的新型火工品，如半导体桥起爆点火技术、直列式起爆点火技术、激光起爆点火技术及 MEMS 火工品技术等。这些新型火工品技术的发展与应用，不仅大幅度提高了火工品的安全性、可靠性等战术技术性能，也有效推动了火工品向信息化和微型化方向的发展，对推动导弹武器系统整体技术水平的提升发挥了重要的作用。

4.1 半导体桥起爆点火技术

半导体桥（Semiconductor Bridge, SCB）火工品，是指利用半导体膜（或金属—半导体复合膜）作发火元件。与传统的灼热桥丝式火工品相比，SCB 火工品具有高安全性、高可靠性、高同步性、高工艺一致性、低发火能量以及能与数字逻辑电路组合等一系列的优异性能，它的诞生是电火工品的一次革命性飞跃。

SCB 火工品诞生于 1968 年，真正开始引起人们重视是在 20 世纪 80 年代中期，美国桑地亚实验室对 SCB 火工品进行了研究和完善，并于 1987 年获得了专利。

SCB 火工品首先是用于军事，由于其优异的性能，很快就转入民用领域的应用研究。SCB 火工品现已用于灵巧或智能武器、卫星、弹药及民用防撞气囊和爆破工程等，开发前景十分广阔，是取代桥丝式火工品的最佳低输入能火工品。

4.1.1 结构组成

SCB 是 SCB 火工品电热换能元件，是 SCB 火工品的关键组成部分，其结构和性能直接影响到 SCB 火工品的性能。经过多年的发展，先后出现以下几种结构。

1. 多晶硅半导体桥

1) 结构

此种 SCB 于 1968 年由 Hollander 发明，是最早的 SCB 火工品。SCB 结构简图如图 4-1 所示。由夹在蓝宝石（或硅）基片与铝（或钨）焊盘层之间呈 H 形的重掺杂多晶硅构成，掺杂浓度约为每立方厘米 7×10^{19} 个原子。典型半导体桥的尺

寸约为 $100\mu\text{m}$ (长) $\times 380\mu\text{m}$ (宽) $\times 2\mu\text{m}$ (厚), 体积约为 $7.6 \times 10^{-8} \text{cm}^3$, 约为镍铬桥丝的 $1/35$, 电阻约 1Ω 。

半导体桥火工品的结构与常规电火工品基本相似, 主要区别是常规电火工品以焊在电极塞上的金属丝或带为桥, 而半导体桥火工品则是以硅基片或蓝宝石基片上的细的重掺杂硅条为药剂的发火桥。这种重掺杂硅桥统称为半导体桥。半导体桥膜用互补金属氧化物半导体技术制成, 即在陶瓷电极塞内的蓝宝石或硅基片 (面积约为 2mm^2) 上沉积生长一层厚度约为 $2\mu\text{m}$ 的 N 型重掺杂多晶硅层, 经氧化、光刻、掩膜、洗蚀工序形成预定形状的半导体桥; 之后, 在其上沉积一层厚度 $1\mu\text{m}$ 的铝层, 再经光刻、掩膜、洗蚀工序形成具有铝焊盘的成品半导体桥; 最后, 采用超声波焊接方法将铝线焊在铝焊盘与电极塞内脚线柱之间。半导体桥火工品结构如图 4-2 所示。

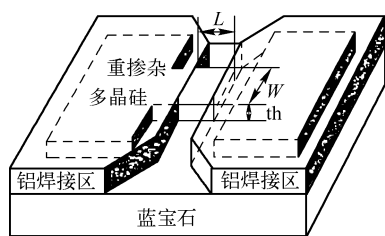
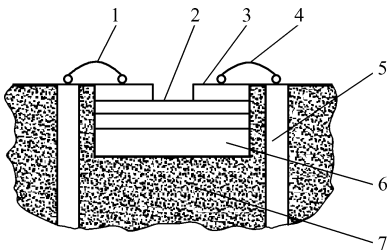


图 4-1 SCB 结构简图



1—铝线；2—多晶硅层；3—铝焊盘；4—铝线；5—脚线柱；
6—硅基片；7—陶瓷电极塞。

图 4-2 半导体桥火工品结构图

2) 桥形及封装

半导体桥的形状不同对半导体桥火工品的性能会有较大影响。常规的半导体桥形状是长方形, 当电流通过时, 在整个桥宽范围内, 电流密度均匀分布, 桥面均匀加热, 临界发火能量较大; 而图 4-3 所示的几种半导体桥形状中间或两端较窄, 通电时缺口处电流密度大, 气化容易从中部开始。与常规长方形桥形状相比, 这几种桥形状的发火能量较低。其中由于图 4-3 (b) 是图 4-3 (a) 和图 4-3 (c) 的综合, 所以, 其发火能量最低。

半导体桥的第一代封装多采用陶瓷封装结构, 即先将芯片用环氧树脂黏结在陶瓷塞上端面的脚线间, 然后用超声波将金属脚线焊接在芯片上的铝焊接区上, 如图 4-4 所示。但这种工艺往往存在陶瓷破裂和焊线断开或接点松动问题。

第二代封装由美国 Frank N.Mandigo 等人于 1989 年发明, 如图 4-5 所示。封装材料为金属和聚合物, 无陶瓷, 减少了处理时或因热致机械应力使封装破裂的危险。没有焊线, 消除了焊线断裂或脱焊而引起装置失效的危险。此种改进型封装结构简单, 牢固可靠。

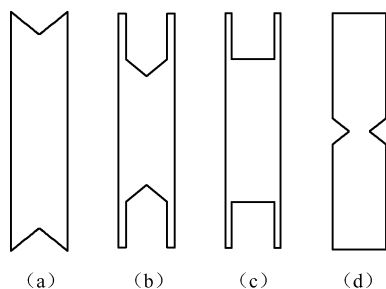


图 4-3 几种半导体桥形状

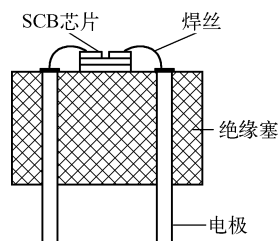
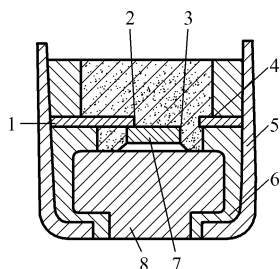


图 4-4 第一代封装结构图

2. 单层金属半导体复合桥

钨/硅 (W/Si) SCB 是由 D.A.Benson 博士于 1990 年发明的，其结构如图 4-6 所示。由未掺杂的多晶硅上覆盖一层钨构成，即用 WSi 取代了 Hollander 的重掺杂多晶硅。当电流通过桥时，首先大量电流从钨中流过，接着钨/硅被加热，其中钨中电阻增加，电流减小，而硅中电阻迅速减小，电流增加，最后硅被汽化形成等离子体放电。



1—垫圈；2—结合点；3—内部导电通道；4—芯片连接器；5—管壳；6—介电层；7—芯片；8—芯电极。

图 4-5 第二代封装结构图

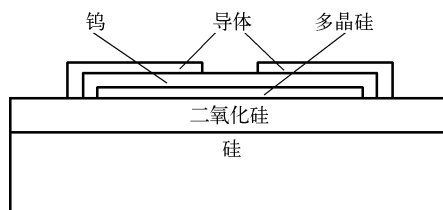


图 4-6 单层金属半导体复合桥结构图

钨/硅导体桥很好地解决了多晶硅半导体桥存在的易腐蚀、电子迁移等问题。Bernardo Martinez-Tovar 等人在此基础上发明了钛金属半导体复合桥，将上述钨层用钛代替。由于钛的熔点为 1660K，低于硅蒸发时的温度，在硅层蒸发前就已经熔化。另外，钛层受热时还可以与环境中的氧气和氮气发生放热反应，进一步提高了半导体桥的点火能力。由于产生的火花量有限，因此对桥与药剂界面的要求比较苛刻，少许的间隙也会影响发火甚至导致不发火。

3. 多层金属半导体复合桥

多层金属半导体复合桥是由 Bernardo Martinez-Tovar 等于 2000 年 10 月发明的，其结构如图 4-7 所示。

该结构的 SCB 主要是对基本型重掺杂多晶硅的改进，由硅或蓝宝石基片、重

掺杂多晶硅层、钛/钛-钨/钨（Ti/Ti-W/W）复合层构成。Ti/Ti-W/W 复合层可以覆盖重掺杂多晶硅层，也可只覆盖两端，中间空出。在制作工艺过程中，Ti/Ti-W/W 复合层均采用金属溅射技术，不存在退火过程。该结构克服了基本型结构中使用铝基层的电迁移问题或钨基层因退火引起的氧化问题。试验表明，通过了 5min 不发火试验。全发火试验中，本结构的作用时间和消耗能量均小于基本型结构的值。由于多层金属结构与半导体之间黏着力强，减少了金属—硅界面的接触电阻，并增加了金属层向底层的传热，提高了火工品的安全性。

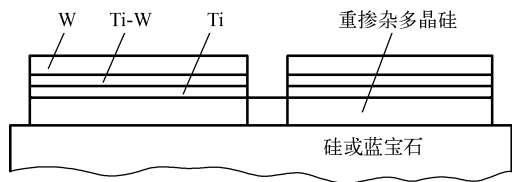


图 4-7 多层金属半导体复合桥结构图

这个结构稍比基本型结构复杂，制作成本也略高，但其性能优越，是最有应用价值和发展前景的一种。

4.1.2 工作原理

1. SCB 工作机理

以基本型半导体桥为例，介绍 SCB 火工品工作原理。基本型 SCB 结构简图如图 4-8 所示。

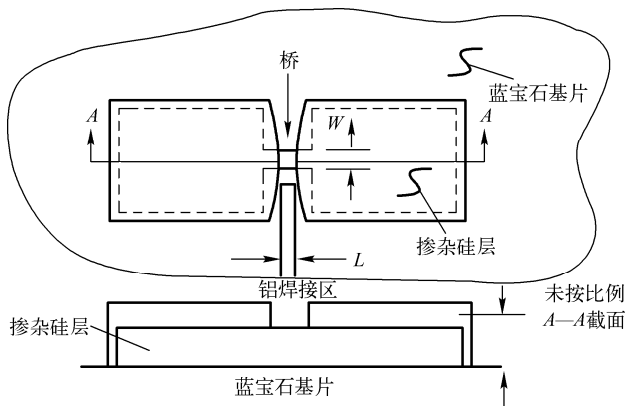


图 4-8 基本型 SCB 结构简图

SCB 最主要的特点是以半导体桥替代了传统的灼热桥丝，其主要工作机理也正是由半导体桥材质——硅性能决定的。图 4-9 是硅的电阻率与掺杂浓度和温度的关系曲线。

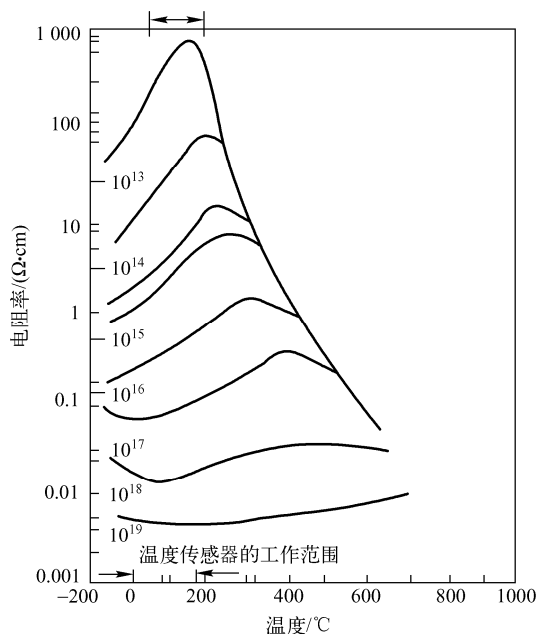


图 4-9 硅的电阻率与掺杂浓度和温度的关系曲线

由图 4-9 可见，随温度升高，高掺杂半导体材料电阻变化不大，略有升高。当温度高于 800℃后，其电阻变为负温度系数。该性质使得高掺杂半导体桥 SCB 在加热过程中易形成温度升高→电阻略下降→热功率增大的正反馈效应。同时，硅、多晶硅材料中固态原子转换为带电的气态粒子所需的电离能量远远低于 Ni-Cr、Au 之类的金属材料。因此，在高温下，高掺杂半导体材料做成的 SCB 易形成高温等离子体，并以微对流的方式渗入起爆药中使之起爆。这种热交换方式具有更高的效率，可导致发火能量降低和作用时间缩短。

2. 与传统火工品对比

导弹武器系统的发展对电火工品主要有三方面基本要求：一是安全可靠，二是低发火能量、小尺寸，三是高瞬发度。常规金属桥丝（含膜桥）火工品的发火机理是热起爆，即用热传导方式使炸药温度升高至发火温度。常用的 Ni-Cr 或 Au 金属桥丝，其电阻是正温度系数，温度升高，电阻值增加，在恒定的电源电压下，由于电阻值随温度的升高而加大，因而流过电阻的电流相应地降低，使得桥丝的加热速度很慢，且 Ni-Cr 或 Au 材料的熔点高，汽化温度高，需要很大的外加能量和较长的时间才能形成高温等离子体。因此，Ni-Cr 金属桥丝只能起熔断丝式的加热作用，通过热传导来引爆炸药。其高瞬发和高安全性是以发火能量高、外形尺寸大为代价的。金属膜桥火工品虽解决了发火能量低与高安全性要求的矛盾，但使用低发火能量很难获得高瞬发度。

SCB 则是利用了半导体特有的负温度系数、低热容及微对流机理，采用具有

高能量的冲击波引爆炸药，很好地解决传统火工品无法克服的高安全性、高瞬发度与低起动能量之间的矛盾。

4.1.3 主要特点

1. 高安全性

半导体桥火工品所装药剂与半导体桥及其硅衬底紧密接触，增大了散热面积，且硅衬底具有良好的散热性，有利于提高安全电流。其不发火能量等于全发火能量的 80%，比桥丝式的散布精度高。其防射频、抗静电和杂电的性能好，不发火性能优良，安全性好。

2. 高瞬发度

半导体桥对药剂的发火机理属等离子微对流作用机理，有利于提高瞬发度。当向半导体桥施加一个快速电脉冲时，具有负电阻温度系数的桥材料将使电流急剧增加，导致半导体桥区迅速汽化，接着电流通过硅蒸气产生热等离子体，并以微对流的方式渗入起炸药中使之起爆。这种热交换方式具有更高的效率，可导致发火能量降低和作用时间缩短。SCB 作用时间比桥丝快 1~2 个数量级，因而具有更好的同步性。

3. 低发火能量、小尺寸

(1) 半导体桥材料的电阻温度系数为负值，有利于低能量发火。当输入脉冲电流温度上升时，由于电阻温度系数为负值，温度越高则电阻越小，通过的电流急剧增加，有利于低能量发火。

(2) 半导体桥热容小，同样有利于降低发火能量。半导体桥有较小的质量，约为钨丝的 1/10，当快速脉冲作用时，可近似认为其热容相当于钨丝的 1/10，即对同一药剂而言，起爆能量也仅相当于钨丝电火工品的 1/10。

(3) SCB 的体积约为桥丝的 1/30。

4. 数字化、低成本

SCB 采用现代微电子设计与制造工艺，可采用微电子延期电路控制延期时间，延期精度高，时间精度可高达 0.5%；可与复杂数字电路组合，连接微型机或逻辑电路，接受特定编码信号的控制；在 SCB 火工品上安装光电管类光电阵列元件，可构成以光或激光为激光源的光电火工品。SCB 可进行自动化大批量生产，一致性好，成本低。

几类电雷管的发火性能对比如表 4-1 所列。

表 4-1 几类电雷管的发火性能对比

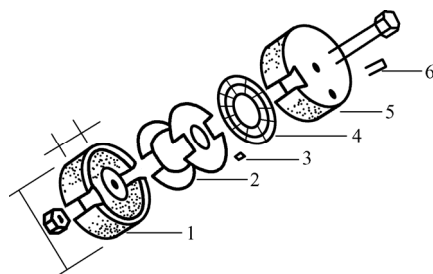
性能指标	常规桥丝雷管	钝感桥丝雷管	金属膜桥雷管	半导体桥雷管
发火能量	10	10	10	1
瞬发度/ μ s	10~100	100~1000	10~100	10~100
安全指标	<1A/1W	1A/1W	1A/1W	>1A/1W

4.1.4 典型应用

半导体桥火工品的结构与常规电火工品的结构基本相似。原则上，所有应用常规桥丝式电火工品的系统都可以使用半导体桥火工品。半导体桥火工品具有高安全、高瞬发、低发火能量等优异的性能，自 20 世纪 80 年代后期得到了迅速的发展和应用。

1. 点火装置

目前主要的 SCB 点火装置有火炮点火器、导弹点火器、光电炸药点火器、数字逻辑发火装置等。其中的导弹点火器由美国 Eglin 空军基地支持，由桑迪亚实验室研制完成。该装置利用导弹高压脉冲，采用变压方式向 SCB 加低压而引燃（不爆）点火药，其结构如图 4-10 所示。



1—下半壶形铁芯；2—50 匝初级线圈；3—半导体桥；

4—聚酰亚胺薄片包覆 1 匝次级线圈；5—上半壶形铁芯；6—药柱。

图 4-10 导弹点火器结构

2. 起爆装置

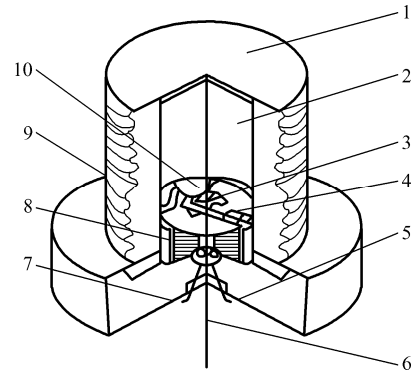
SCB 起爆装置主要有起爆药雷管、DDT 雷管、飞片雷管、冲击片雷管、灵巧半导体桥雷管、可编程电子延期雷管及松装点火药复合式延期雷管等。

以 SCB 灵巧半导体桥雷管为例。该装置由美国桑迪亚实验室研制，其结构如图 4-11 所示，由 SCB、可控硅整流器开关、炸药、电容器和小型电容器放电装置（CDU）/逻辑发火装置组成，总装在直径为 19.1mm、长度为 25.4mm 的不锈钢材料外壳中。装药为氮化铅、太安，药量在 30~180mg，当发火能量为 2mJ 时，作用时间将小于 5 μ s，不发火电流达到 1.5A，并能通过静电放电试验。

该装置是集发火控制装置、半导体桥、装药于一体的“灵巧半导体桥元件”。只有在接通充电电路，并向可控硅整流器逻辑电路门输入 16 位、4V 制编码信号后，才能导通向半导体桥输入电能的通路，否则不允许 SCB 作用。起爆装置具有控制发火、精确延期、防射频防静电等功能。

这种半导体桥雷管具有体积小、低激发能、作用快、安全可靠等特点，能与保险、发火和开关等微电子电路集成于一体，适应于多点起爆系统，可作为一种

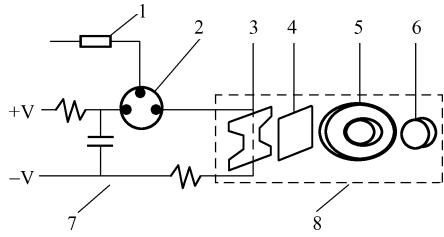
“灵巧”元件直接用于高技术弹药系统。



1—密封盖；2—装药；3—半导体桥；4—电阻；5—光电编码电压信号输入脚线；
6—负脚线；7—正脚线；8—电容器；9—管壳；10—可控硅整流器开关。

图 4-11 灵巧半导体桥雷管

SCB 冲击片雷管（图 4-12）是靠 SCB 产生的等离子体的作用使飞片射出撞击到猛炸药上而引爆，它可用于直列式爆炸序列，具有比爆炸箔雷管起爆能量低、价格低一个数量级的特点。



1—触发电路；2—电子开关；3—SCB；4—绝缘塑料飞片；
5—圆筒；6—炸药；7—输入电路；8—飞片装置。

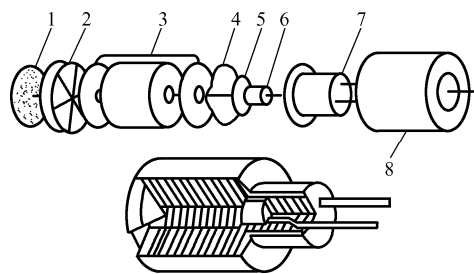
图 4-12 SCB 冲击片雷管原理图

3. 动力源装置

SCB 动力源装置主要有 SCB 射孔弹、SCB 气体发生器、SCB 推冲器等，这些装置比桥式的作用迅速、安全可靠。其中的 SCB 推冲器，用于精确制导导弹弹道末端修正弹道，使其对目标有较高的命中精度，从而能提高压制武器、反导武器的远程精确打击能力。

典型半导体桥推冲器结构如图 4-13 所示。它由点火元件、外壳、波形簧、发射药柱及挡板等组成。点火元件包括管壳、药管、带半导体桥的陶瓷电极塞、点火药柱等，用低能量（3mJ）、短脉冲（20μs）的电流可以使其快速响应点火（60μs）。半导体桥正常作用要求快速电流脉冲（上升时间约 100ns），才能使桥

汽化成等离子流。



1、5—密封盘；2—挡板；3—发射药柱；4—波形簧；6—点火药柱；7—电极塞；8—外壳。

图 4-13 典型半导体桥推冲器结构

这种推冲器具有发火能量低、发火时间短且安全钝感等突出优点，因而使用半导体桥的推冲器，是实现导弹姿太调整系统快速响应点火，且满足钝感安全要求的最佳元件。当装药为 THKP ($\text{TiH}_{1.65}/\text{KClO}_4$) 时，桥丝式和半导体桥推冲器性能对比如表 4-2 所示。

表 4-2 桥丝式和半导体桥推冲器性能对比

类 型	桥尺寸 / μm	发火能量 /mJ	5 分钟不发火 电流/A	静电放电试验 (25kV)	作用时间 / μs
热桥丝推冲器	$\phi 48 \times 1000$	32.6	1.1	通过	3400
半导体桥推冲器 1	$100 \times 380 \times 2$	2.72	1.39	通过	60
半导体桥推冲器 2	$47 \times 140 \times 2$	0.45	1.3	通过	100

目前，SCB 火工品应用和研究已取得了丰硕的成果，但仍有许多工作要进一步完善，这些工作也就是今后研究的方向。第一，要想优化 SCB 火工品，机理及基础研究是关键；第二，要全面替代桥丝式火工品，还需使其生产自动化，以大大降低成本；第三，对低电压点火和起爆装置需要进行研究；第四，要用于直列式爆炸序列，在火工品的钝感技术方面，还得进行投入。

根据现代军民用火工品的要求及现代微电子技术和火工药剂的发展，未来 SCB 火工品的发展趋势：一是降低制造成本和点火电压，即利用微电子行业的自动化生产工艺，开发和生产低成本低电压点火或起爆的火工品，以便广泛替代桥丝火工品；二是钝感化，发展和完善满足直列式爆炸序列的钝感火工品，如冲击片雷管；三是小型化，结合微电子技术、集成技术、封装技术使火工品体积缩小，满足现代小型引信的发展要求；四是安全、精确，即利用微电子集成逻辑电路与 SCB 连接，便于计算机控制使系统安全精确。

4.2 直列式起爆点火技术

直列式起爆点火技术是与隔离式起爆点火技术相较而言的，主要出于对导弹引信起爆及发动机点火安全性考虑。后者安全设计思想是以结构钝感为主，安全要求是满足 1A/1W/5min 不发火，并采用错位或隔离机构对药剂加以防护。前者则强调起爆或点火首发火工品的高安全性，使传爆序列或点火序列直接对正，而不再需要错位或隔离机构防护。

按照美国海军武器系统炸药安全审查局（WSESRB）的技术手册——《非隔断式爆炸序列电子安全与解除保险装置技术手册》的说法：炸药爆炸元件的发展使得爆炸序列的机械隔断不再是必需的了，美国海军把它作为引信安全性设计准 MIL-STD-1316E 的补充（第 6.2 条款）。因此直列式火工品可以实现引爆或点火系统“固态化”（Solid State），在保险状态和解除保险状态，引爆或点火系统没有任何机械动作，简化了引爆或点火系统设计的复杂程度，提高了工作可靠性。

直列式起爆点火技术的前提是首发火工品的高安全性。为此，直列式火工品不再使用敏感的始发药剂，而直接激发传爆药或传火药（扩火药），激发条件则是非常苛刻的冲击大电流，在目前威胁弹药和固体火箭发动机安全的各种环境因素中，这种冲击大电流条件是几乎不可能产生的，从而安全门限确立极高的阈值。而激发条件非常苛刻的原因则是这些炸药的感度低，因此这种引爆或点火方式具有许多优点，除可以“固态化”并取消机械可动安全与解除保险装置外，还有诸如抗静电、射频、杂散电流、电磁脉冲等恶劣电磁环境和高冲击过载等恶劣力学环境的能力。

西方国家经过 50 余年的发展，早已实现产品的制式化，逐步替代隔离式爆炸序列应用于多种常规弹药，如空空导弹、空地导弹、战术导弹、远程火箭弹等，并不断致力于小型化的发展。我国从 20 世纪 70 年代末开始对直列式爆炸序列开展了相应跟踪研究，经过多年的努力，取得了突破性成果，达到了较高的可靠性水平。

与传统隔断式起爆点火技术相比，直列式起爆点火技术具有高安全性、高可靠性及较强的抗电磁环境和极限力学环境的能力，此外，还具有结构简单、体积小、质量小、瞬发度高等优点。

4.2.1 系统组成

直列式起爆点火系统主要由安全与解除保险系统（含环境传感器）、升压控制电路（脉冲高压功率源）和冲击片雷管（或冲击片点火管）组成，其系统原理框图如图 4-14 所示。来自外文资料上的直列式起爆点火系统组成如图 4-15 所示。

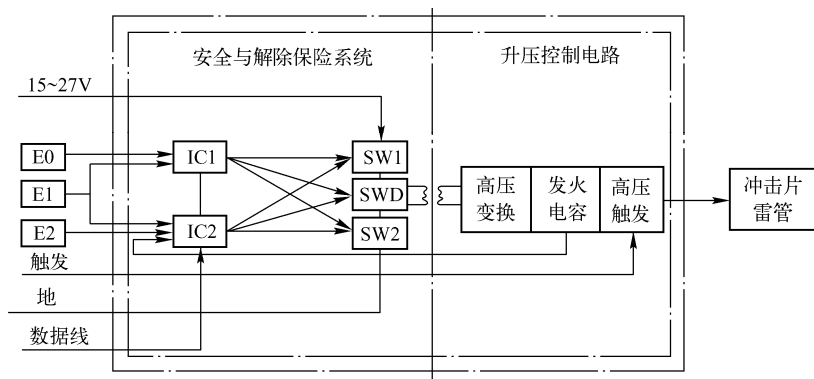


图 4-14 直列式起爆点火系统原理框图

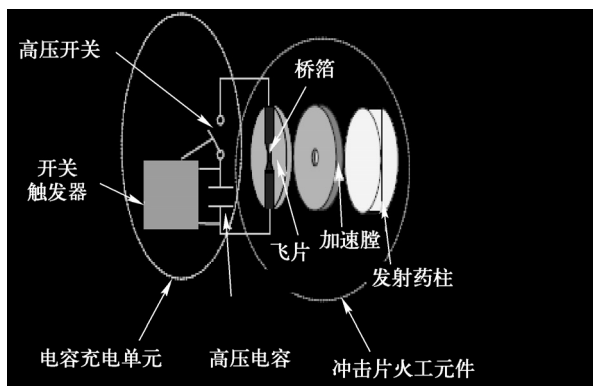


图 4-15 直列式起爆点火系统组成图

1. 电子安全与解除保险控制系统

对直列式起爆系统而言，最有效的控制系统是全电子安全系统。冲击片雷管虽然有很高的安全性，但由于它与下一级装药处于对正状态，没有机械隔离装置，控制系统一旦错误地发出了起爆指令，必然会直接导致弹药起爆，因而对控制系统的要求更为严格。电子安全与解除保险控制系统是采用阈值、顺序、时间窗、举手表决、动态校核、实时监控等控制策略研制的安全系统，是对环境信号接收、分析处理、阈值判断并控制起爆系统是否动作的电子控制中心。

工作过程是：供电后由控制器对环境传感器提供的环境信号进行读取、识别，只有当环境信号全部符合预定要求且达到安全距离后，动态开关才能工作，使高压变换器对高压电容器充电。当接收到目标信号或点火指令时，高压开关闭合，电容器快速放电，使冲击片雷管起爆，或冲击片点火管起动，从而起爆战斗部，或使导弹发动机点火。

2. 升压控制电路

升压控制电路即脉冲功率源主要由高压变换、发火电容和高压触发三部分组成。

(1) 高压变换部分：利用高频开关电路，将输入的 27V 电压，升压至规定的高压值。

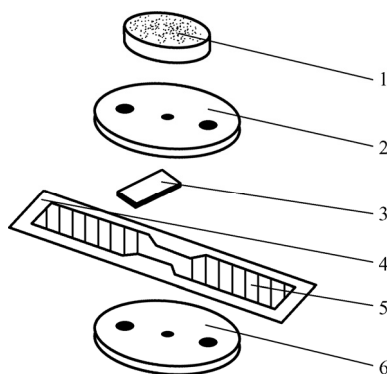
(2) 发火电容部分：接在高压输出端上，进行脉冲高压能时储存。

(3) 高压触发部分：当引信起动信号或导弹发动机点火信号到来时，接通触发开关，向冲击火工品放电。

3. 冲击片雷管（或冲击片点火管）

冲击片雷管（或冲击片点火管）是直列式起爆点火系统的核心部件，其结构简单，主要元件有桥箔基片、桥箔、飞片、加速膛及低感度药柱等（图 4-16）。桥箔是由绝缘介质基片上的覆铜箔蚀刻制成，飞片通常是粘在桥箔上的一块聚酰亚胺薄膜，飞片上部有加速膛，加速膛上部带有低感度药柱。

工作过程是：当强大的电流脉冲通过金属桥箔时，桥箔爆炸后产生的等离子体迅速膨胀，并使从加速膛中心孔中剪切下的飞片加速，飞片经过加速膛加速后高速撞击低感度药柱，当飞片撞击炸药产生的入射能量大于炸药的冲击起爆临界能量时，炸药将会起爆或发火。



1—低感度药柱；2—加速膛；3—飞片；4—桥箔基片；5—桥箔；6—反射片。

图 4-16 冲击片火工元件分解图

4.2.2 冲击片雷管

早在 20 世纪 60 年代，就有人开始了对金属箔瞬间施加强电流脉冲，使其迅速汽化，产生高温高压等离子体直接引爆与其接触的炸药的研究。到了 20 世纪 70 年代，美国就已经有了冲击片雷管专利，并作了公开报道。由于冲击片雷管不使用起爆药和松装猛炸药，且爆炸箔与炸药不直接接触，所以它对于机械冲击、

静电、杂散电流、射频等都有较强的抵抗能力，是一种极其安全可靠的雷管，适用于直列式爆炸序列，在钝感弹药中有着广阔的应用前景。目前，冲击片雷管在美国已经实现机械化批量生产，应用于导弹起爆系统中，如“陶-2B”反坦克导弹、“爱国者”防空导弹、“ATACMS”陆军战术导弹等。

1. 冲击片雷管原理

冲击片雷管的设计主要是建立在两大原理的基础上：一是给薄的金属导体在微秒内施加数千安的强电流脉冲时，金属导体将迅速汽化，产生高温高压的等离子体，等离子体驱动飞片；二是 Walker 和 Wasley 提出的非均质炸药短脉冲起爆判据 $p^n\tau = \text{常数}$ ，炸药能否被起爆，由压力 p 和压力持续时间 τ 两个因素决定，在冲击片雷管中，在炸药特性和飞片材料确定的情况下，压力 p 主要取决于飞片速度，时间 τ 主要取决于飞片厚度。

从图 4-17 可以看出，冲击片起爆装置中的电容器放电，对爆炸箔两端施加一个高电压，数千安的电流脉冲通过爆炸箔，使其瞬间汽化爆炸，由此产生的等离子体迅速膨胀，形成极高的压力，这个压力在背板材料的限制下，从炮管中心空中剪切下一个小飞片，小飞片在通过炮管的过程中还继续受到等离子体压力的加速作用，通过炮管后达到每秒几千米的速度，再撞击在炸药柱上，在炸药端面激起压力为 p 、持续时间为 τ 的冲击波，当 $p^n\tau$ 超过炸药的冲击片起爆临界值时激起炸药爆轰。

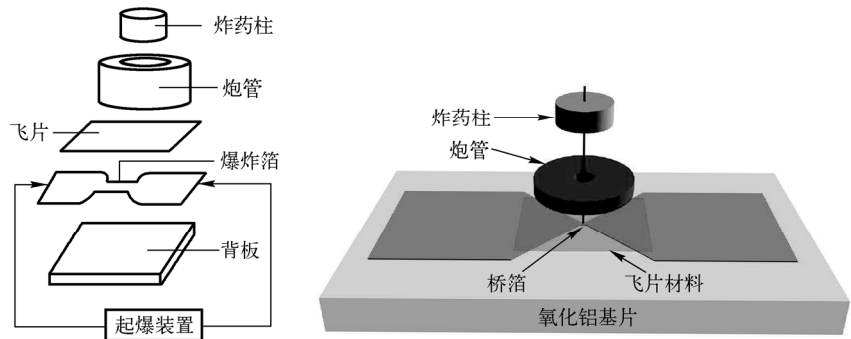


图 4-17 冲击片雷管结构图

2. 冲击片雷管组件

1) 起爆装置

在冲击片雷管系统中，起爆装置的作用是为爆炸箔提供能量，引爆爆炸箔，产生高温高压的等离子体。起爆装置的主要元件是一个电容器和一个开关，对于电容器，由于爆炸箔爆炸需要很高的能量，因此电容器的容量应尽可能大，以便储存更多的电能，同时由于箔爆炸时间很短，超过箔爆炸时间后放出的电能对飞片飞行的速度影响已经不大了，而电容器放电也需要一定时间，所以要求电容器

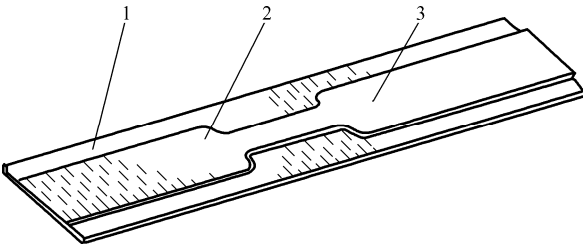
的放电周期也应尽可能短，为了降低电容器的放电周期，必须大大降低电容器的电感，因此起爆装置中的电容器应该是一个低电感大电容的电容器；对于开关，也要求其具有足够快的闭合速度，以及很低的电感；对于整个起爆装置的线路来说，也要求其具有很低的电感，一般不大于几十纳亨，否则，电容器放出的电能将在线路上损失很大，影响爆炸箔的正常起爆。

2) 爆炸箔

爆炸箔是冲击片雷管中的核心部件，其材料和形状参数将直接影响冲击片雷管的性能。箔爆炸的过程就是箔输入电流，通过电阻产生热量，使箔在极短的时间内完成固—液—汽—等离子体四态的相转变过程。只有当输入箔的能量大于或等于箔汽化所需的能量时，箔才会发生爆炸，否则箔会像普通保险丝那样熔化掉。

在箔材料的选择时，通常选用爆炸时初始电阻率较大，而升华热较低的导体作为爆炸箔材料，其中 Ag、Cu、Al 和 Au 都是较好的电爆炸导体，但 Au 和 Ag 很贵重，Al 的焊接性能不好，所以通常都选用 Cu 作为爆炸箔材料。箔的厚度通常在 4~75 μm ，太薄的金属箔不能提供足够的膨胀力来驱动飞片，太厚的箔需要的能量太大。

为使桥箔均匀受热，控制拐角处加热速度过快于中心处的现象，对桥箔设计时应将拐角处设计为圆弧形（最佳圆弧半径为 0.178mm），且应光滑，不能有毛刺。桥箔加热越均匀，飞片就越平整，在加速膛中的飞行就越平稳。典型桥箔形状如图 4-18 所示。



1—塑料基片；2—桥箔；3—扁平电缆。

图 4-18 典型桥箔形状

3) 飞片

飞片材料一般选用聚酯薄膜或聚酰亚胺膜。各种炸药的发火试验证明，聚酰亚胺膜飞片具有极佳的加载特性，并且它是一种高分子有机物，具有优良的耐热性、耐辐射性和耐溶剂性，因此，大多冲击片雷管都采用聚酰亚胺膜作为飞片材料。飞片装配图如图 4-19 所示。



图 4-19 飞片装配图

美国陆军还开展了将聚对二甲苯（Parylene）用于飞片材料的研究。由于聚对二甲苯材料适合印刷电路板应用，且安定性好，与聚酰亚胺薄膜及聚酰亚胺等其他聚合物材料相比有诸多优点。这些特性可提高冲击片雷管的性能以及可预测性和稳定性。

飞片的厚度同其在炸药面上的作用时间成正比关系，但同其速度成反比关系，而速度又决定压力 p 的大小，根据 $p^n \tau$ 要大于或等于某一常数炸药才能起爆的判据，飞片厚度越薄越好，但太薄在炮管中不能平稳飞行，且脉宽太窄会影响炸药起爆感应时间，反而影响炸药的正常起爆，因此飞片的厚度一般为桥箔厚度的 5~10 倍。

4) 炮管

炮管在冲击片雷管中有三个作用：一是在等离子体的作用下将飞片沿炮管内径边缘剪切成与炮管内径相等的小飞片，并在炮管中加速前进；二是消除桥箔四个角上出现的很高的电压梯度；三是限制稀疏波对等离子体强度的削弱。为此要求炮管的内径必须很圆，内径边缘要具有非常好的刀刃性，能够均匀剪切飞片，且炮管内径光滑，以保证飞行过程的平稳性。

炮管材料可选用玻璃、陶瓷、有机玻璃、蓝宝石、红宝石等，在国外大多选用蓝宝石作为炮管材料，因为其硬度高，可达莫氏 9 级，密度 3.98kg/cm^3 ，能均匀剪切飞片；加工性能良好，能够加工得很圆。用蓝宝石加工成的炮管内径边缘锋利，对飞片起爆炸药的效果有良好的保证。但蓝宝石价格昂贵，大多使用金属材料作为炮管材料，精密加工后也能达到蓝宝石的效果。

炮管的长度应为爆炸箔厚度的 50~100 倍，太短不能将飞片加速到足够起爆炸药的速度，太长虽然有利于飞片速度的提高，但也会影响飞片在炮管中飞行的平稳性，另外在长炮管中，飞片飞行前方产生的激波会逐渐减慢飞行速度。

在确定炮管直径时，一般采用直径略大于爆炸区宽度的方式，直径通常为桥箔宽度的 1.5 倍。这样爆炸箔爆炸时就能将飞片沿炮管边缘均匀地剪切下来，飞片的形状和尺寸可以被精确地限制。总之，最佳的炮管尺寸应该能够最大限度地

5) 药柱

冲击片雷管一般都使用高密度猛炸药作为药柱，如 HNS、TATB 等。六硝基均苯乙烯（俗称六硝基芪，HNS）炸药是一种热稳定性很好的钝感高能炸药。特别是满足高比表面积、高纯度和稳定形貌的超细 HNS，其对短脉冲冲击波更加敏感，在用于冲击片雷管时能够提供稳定的阈值起爆能量。而机械感度、静电感度较低，耐热、抗辐射性能又好，既安全又易于起爆，目前已成为最重要的冲击片雷管药剂。除 HNS 外，TATB 也是一种很有应用潜力的冲击片雷管起爆药。国外已经成功利用小飞片起爆 TATB，现在用于冲击片雷管的 TATB 的颗粒很细，比表面可达每克几十平方米。药柱的密度为理论密度的 90%~95%，这样有利于保证药柱具有一定的强度，便于装配，还可以承受一定的长脉冲冲击。炸药的颗粒度对于冲击片雷管的起爆阈值有着显著的影响。细化后的炸药颗粒对于小飞片这样的短脉冲变得极为敏感，而对于机械撞击类的长脉冲变得钝感，这有利于提高冲击片雷管的安全性，降低冲击片雷管的起爆能量。

6) 背板

背板的作用主要有：一是限制爆炸箔爆炸产生气体的空间，防止爆炸箔产生的等离子体的散失，使爆炸箔产生的等离子体尽量多地用于形成和驱动飞片；二是由于爆炸箔爆炸时要形成冲击波，冲击波以爆炸区为中心向四周介质传播，背板的作用就是将传递到背板表面的冲击波能量再反射回去，以增加用于加速飞片的能量，而不是通过背板材料传播出去；三是便于组件的安装。总而言之，背板的作用就是最大限度地利用爆炸箔爆炸的能量来加速飞片。

背板材料影响其性能的因素主要有密度、表面光洁度、厚度和硬度等。对背板材料的要求是致密绝缘，且靠近桥箔基片的表面必须光滑。常用的材料有聚四氟乙烯、聚酰亚胺、玻璃、云母、陶瓷等。从密度来看，聚四氟乙烯密度为 2.0g/cm^3 ，聚酰亚胺密度为 1.4g/cm^3 ，玻璃的密度为 2.16g/cm^3 ，因此，聚四氟乙烯应该比聚酰亚胺有更好的反射性能，但聚四氟乙烯外观暗淡，有明显的粗糙表面，给桥箔爆发等离子体的膨胀留出了空间，其反射性能较差。采用玻璃和陶瓷作为反射片时性能较好，起爆炸药需要的能量较低。玻璃和陶瓷反射片能使系统最大效率地完成电能向飞片加速度的转换。

3. 冲击片雷管特点

从冲击片雷管的结构可以看出，同其他雷管相比，冲击片雷管具有以下特点：

(1) 冲击片雷管不含起爆药和低密度猛炸药，其药柱为高密度、低感或钝感炸药，如 HNS、TATB 等，爆炸桥箔同炸药不直接接触，可抗高过载，进一步提

高雷管的安全性。

(2) 冲击片雷管可在低温、静电、射频、高空电磁脉冲及杂散电流等恶劣环境下保证安全性，能适应战争中的复杂作战环境。

(3) 冲击片雷管在生产、储存和使用过程中也十分安全。

(4) 冲击片雷管具有很高的瞬发度，为微秒级雷管，容易实现高的爆炸同步性。

(5) 冲击片雷管的缺点是起爆阈值能量很高，导致储能电容器过大，不利于中小型武器的使用。

4.2.3 冲击片点火管

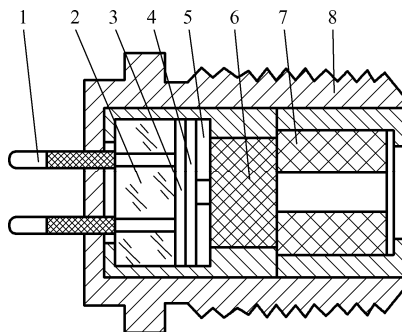
点火系统的安全性是导弹武器系统安全的重要组成部分。事实上，在运输、装填、发射等情况下，点火序列存在的意外发火的可能性要高于引信的传爆序列。传统的导弹点火系统使用的钝感电点火器，虽有一定的安全性，但仍存在安全隐患，不能完全解决射频危害问题，如不能抗闪电及高空电磁脉冲等。为保证发动机点火安全性，多采用安全点火装置，采取隔断式的方式，将首发点火火工品与后续的传火序列隔离，以保证勤务处理过程中不发生发动机意外点火事故。然而隔断式点火系统不可避免地存在导弹非有效载荷增加，安全环节增多导致点火可靠性下降，首发火工品安全余度有限，以及火工品维护、检测、保障过程繁杂等一系列问题。

1992年，美国军标 MIL-STD-1901《火箭弹和导弹发动机点火系统安全设计准则》规定了弹药推进系统解除保险和发火使用的设计安全准则，首次提出了直列式点火系统的概念。直列式安全点火系统，又称非隔断点火系统，即点火序列中各点火元件之间无任何机械的隔断（包括错位），也就是说，由于直列式安全点火系统本身具备极好的安全性能，无须在它和引燃药盒、点火器之间设置任何机械隔断，如安全机构、隔板等，而是直接对准目标装药。1992年在美国尤马国家靶场进行了用于火箭发动机点火的直列式安全点火系统靶场鉴定试验，说明直列式安全点火系统已进入了实际应用阶段。我国对应的标准 GJB 2865—97《火箭和导弹固体发动机点火系统安全性设计准则》，对直列式安全点火系统设计也进行了规范和说明。

直列式点火系统是冲击片起爆技术和全电子安全保险技术迅速发展的产物，与传统的隔断式点火系统相比，主要区别是以冲击片点火管代替常规点火管，并将常规点火药更换为钝感点火药。直列式安全点火系统由电源系统和冲击片点火管组成，其中电源系统与直列式起爆系统对应部分相同，包括电容器、火花隙开关、升压变压器、控制电路等，而冲击片点火管是直列式点火系统的核心。直列式火工品实现了点火系统“固态化”（Solid State），取消了保险与解除保险的机械动作，简化了点火系统的复杂程度，大幅度提高了工作可靠性。

1. 冲击片点火管工作原理

冲击片点火管结构如图 4-20 所示，主要元器件由发火引线、反射片、桥箔、飞片、加速膛及超细 B/KNO_3 药柱构成。它的作用过程是：当强大的电流通过金属桥箔时，金属桥箔发生爆炸，产生的等离子体迅速膨胀，剪切贴在桥箔上方的聚酰亚胺飞片，并推动飞片以高速撞击超细 B/KNO_3 药柱输入端表面，使药柱爆燃，点燃药盒中的 B/KNO_3 空心药柱，相继点燃火箭发动机点火药及推进剂。



1—发火引线；2—反射片；3—桥箔；4—飞片；5—加速膛；
6— B/KNO_3 药柱；7— B/KNO_3 药盒；8—点火管外壳。

图 4-20 冲击片点火管结构示意图

2. 冲击片点火管组件

1) 药剂选择

与热桥丝点火机理不同，冲击片点火管是采用冲击波能量点燃点火药。 B/KNO_3 点火药是火箭发动机使用的高能点火药，又是直列式点火序列中的许用点火药，比较钝感，在点火序列中不需要安全隔断，也是美国军标 MIL-STD-1901 明确提出的唯一的直列式许用点火药。要求 B 粉的纯度为 91%，比表面积为 $35\text{m}^2/\text{g}$ ，粒度为 $1.4\mu\text{m}$ ； B/KNO_3 的粒度小于 $15\mu\text{m}$ 。 B/KNO_3 点火药可压制成药柱后装入壳体内，也可直接压入壳内。压药密度为 $(1.60 \pm 0.02) \text{g}/\text{cm}^3$ 。

2) 加速膛设计

加速膛的长度对 B/KNO_3 的发火率有影响，因为飞片从加速到形成最高速度需要一定的距离。

在飞片厚度一定的情况下，加速膛的直径决定了飞片的质量。一般情况下，加速膛的直径为桥箔宽度的 1.5 倍。若使用较小直径的加速膛，不但给装配带来困难，而且还会遮挡汽化桥箔的某些外延区域，使这些区域的能量不能用于加速飞片，也就是说部分能量被浪费掉，因此，存在一个使电能到飞片动能转换效率最大的最佳直径。

试验结果表明，用冲击片点燃 B/KNO_3 时，加速膛最佳直径为 $\phi 0.5\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。

3) 桥箔宽度设计

桥箔宽度对发火能量有影响, 因为桥区尺寸决定着桥箔材料汽化和膨胀的能量。因为点火时要求的加速腔较长及飞片较厚, 需要更多的等离子体驱动飞片, 所以, 点火需要较宽的桥箔。试验结果表明, 桥宽小于 0.35mm 时, 起爆率很低。对于冲击片点火而言, 当桥箔尺寸为 $0.6\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ 时, 发火能量较低。也就是说, 在此条件下系统参数较为匹配。

4) 桥箔带状线长度

为了使桥箔的电感尽可能低, 在保证其最终使用长度下应减少带状线的长度。对不同的带状线长度, 桥箔电感和电阻随带状线长度的减小而减小。另外, 试验表明, 圆柱形结构的点火管所用的桥箔, 其电感比扁平式结构减小了近 $9/10$, 电阻降低近 $2/3$ 。因此, 可将冲击片发火桥箔及其他元件放入柱状壳体内, 既能保持原来优化的桥区尺寸, 又能大幅度降低其电感和电阻, 使冲击片点火管发火能量降低, 系统体积减小, 扩大了应用范围。

3. 冲击片点火管特点

1) 极高的安全性

极高的安全性源于它的结构和所用点火药剂。具体可以概括为以下几点。

(1) 所用点火药剂为 GJB 2865—97《火箭和导弹固体发动机点火系统安全性设计准则》规定的直列式安全点火系统许用药剂, 即硼—硝酸钾烟火药。它是和点火器装药相同的药剂, 且不含松装药剂, 为高密度药柱。因此, 其钝感性能和点火器装药为同一等级。

(2) 硼—硝酸钾药柱可以封闭在金属管壳内, 形成的金属外层作为一种屏蔽壳体, 能够很好地消除静电危害。

(3) 桥箔与药剂不直接接触。金属桥箔与药剂之间被通电时形成飞片的塑料膜片和空气隙、金属管壳壁隔离, 使硼—硝酸钾药柱平时与电、热绝缘。

(4) 冲击片点火管的发火条件如下: 电压大于 2kV , 电流大于 1kA 。当电压小于或等于 500V 时, 可以保证不发火。通常所用弹上电源为 27V , 市电为 220V 都不会引起点火管发火, 具有很强的抗静电、射频、杂散电流、闪电及电磁干扰能力。

(5) 电源系统设有电子安全装置, 在下达点火指令前, 电路处于安全(断开)状态。

2) 高可靠性

冲击片点火管采用直列式结构布局, 在使用前不需安全隔断, 没有可移动部件, 可直接对准火箭发动机点火药, 具有较高的点火可靠性。设计可靠性 ≥ 0.995 (置信度 0.95)。

3) 高瞬发性

点火过程具有高瞬发性, 作用时间小于 $2\mu\text{s}$, 能满足各种武器的应用要求,

对于多点点火系统，其作用时间的同时性偏差不大于 100ns。

4) 低发火能量

正常发火能量 $\leq 0.6\text{J}$ （电压 2.8kV，电容 $0.15\mu\text{F}$ ），对弹上电源的要求：电压不小于 5V，电容 $0.15\mu\text{F}$ ，充电时间 0.5s。

5) 抗大过载

在耐受 20400g 冲击过载的条件下，可以正常工作。

6) 高效费比

简化传统点火序列的设计，改变其装药设计，可简化生产工艺，具有较高的效费比。

4.3 激光起爆点火技术

用激光照射物质，当激光功率密度或能量密度达到一定阈值后，被照射物质会发生烧蚀、熔化甚至汽化现象。激光的这种作用被广泛地应用在激光加工、激光切割、激光医疗等领域。同样，当激光照射含能材料，会引起含能材料的点火或起爆。20 世纪 60 年代，激光器刚刚诞生不久，美国就提出了激光点火的概念。所用激光波长为 $0.266\sim 1.06\mu\text{m}$ ，激光器类型有红宝石、 CO_2 、Nd:YAG 固体激光器等多种形式。全部激光器都以脉冲方式工作，且传输辐射能在每平方厘米兆瓦量级。20 世纪 80 年代中期，随着激光器小型化及激光二极管（LD）、低损耗光纤的出现与应用，激光起爆点火技术得到了快速的发展。

激光起爆点火技术是指以电源驱动的激光二极管为能源器件，利用光纤传输能量，以引燃火炸药，然后经传火药过程，点燃推进剂的技术。与传统的桥丝式点火起爆方式相比，激光起爆点火技术具有无可比拟的优势：

（1）用光纤取代桥丝和引线，既可避免因电磁脉冲（EMP）、高功率微波（HPM）、强射频（SRF）和静电等干扰信号产生的误点火，还可避免因桥丝带来的锈蚀，点火后电阻（RAF）和绝缘电阻的变化。

（2）激光起爆点火系统容易实现多点同步起爆，并可重复使用。

（3）利用激光起爆点火技术可实现猛炸药的爆燃转爆轰。

（4）由于激光起爆点火系统中去掉了敏感的起爆药，所以在生产、运输及勤务处理中更加安全。

4.3.1 激光起爆点火机理

当激光辐照到含能材料时，激光与含能材料之间可能发生热作用、冲击作用、光化学作用以及电离和击穿等现象，相应的激光起爆点火机理可分为热机理、冲击起爆机理和光化学机理等。

激光起爆点火机理主要有 3 种。

1. 激光直接引燃药剂

脉冲激光直接照射炸药是最早的激光点火方式，其热作用机理也被人们普遍接受。1978 年孙承纬等人在国内首次从理论和试验上对激光引爆机理做了系统的分析，排除电击穿、冲击波、光压、光化学作用等机理，最后得出激光点火机理是热机理。

激光热起爆主要是利用激光的高强度对药剂产生热作用使之点火。当激光作用于药剂表面时，一部分光能被反射，另一部分光能入射到药剂表面，并且在极薄的表面药层（几微米）内被吸收，这种吸收和反射主要取决于药剂表面的光学性质。由于光热效应，药剂将所吸收的激光能量转化为热量，使其表面温度上升，发生热分解，甚至出现不可逆的燃烧化学反应。从激光与含能材料的作用过程来看，激光点火过程将经历如下几个阶段：第一，含能材料吸收入射激光能量，因为光热转换作用使得激光作用区域的含能材料表面被加热；第二，含能材料因被加热，发生凝聚相化学反应，温度继续升高；第三，不仅在药剂的表面发生凝聚相化学反应，而且在表面上方也存在气相化学反应，这一阶段被认为点火已经发生。

2. 等离子体微对流

等离子体微对流是激光快速加热与药剂接触的金属薄膜，薄膜在高能量密度激光（每平方厘米吉瓦级以上）的照射下，产生高速、高温等离子体，基于微对流方式引燃或引爆药剂。

3. 激光驱动飞片起爆方式

激光驱动飞片起爆就是利用高能激光辐照镀在窗口或光纤末端的金属薄膜，部分金属箔烧蚀产生高温、高压、高密度等离子体，离子膨胀推动剩余薄片，形成飞片高速撞击实现起爆。在金属薄膜内填充一层厚度小于 $0.25\mu\text{m}$ 的介质层，可以使飞片动能与激光能量之比达到 50%，激光驱动飞片点火方式的安全性最高。

4.3.2 激光点火技术

激光点火系统主要由保险与解除保险装置、激光驱动电源、二极管激光器、光纤连接点及激光点火器 5 部分组成（图 4-21）。工作原理是：当解除保险以后，由激光二极管驱动电源为激光二极管提供合适的脉冲或连续驱动电流，使激光二极管产生足够功率和持续脉冲的激光，通过光纤传输到激光点火器，实现点火。

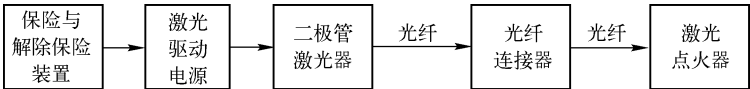


图 4-21 激光点火系统示意图

1. 保险与解除保险装置

激光点火使用的是钝感炸药，可不用隔片，而是通过“断电”或“断光”来

控制激光能量的产生或传输，实现激光点火的保险与解除保险。例如，可以在激光器驱动电路上加保险环节，即电子安保装置；也可在激光器与火工品之间加保险环节，即机电或光电安保装置。采用全电子安全系统的方式实现，其作用是对激光点火单元进行必要的电路保护，提供安全保障。平时处于保险状态确保激光点火单元不会受到干扰发生误动作，在适当的时候解除保险状态，按照要求对起爆信号做出反应。其工作过程是：

（1）由传感器感受环境信息。

（2）由全电子安全系统对环境信息及弹上指令信息进行识别、处理。确定武器系统所处的状态，做出是否解除保险、是否点火的决策。

2. 激光驱动电源

激光二极管（LD）以电流激励方式工作，驱动电路为 LD 提供预定幅值和脉冲宽度的恒定电流，是激光点火系统的发火控制部件。当激光二极管输出功率大于 1W 时，需要的驱动电流为安培级，且电流的稳定性要高，波纹系数要小。

3. 二极管激光器

与固体和气体激光器相比，激光二极管具有体积小、质量小、能效高等突出优点，在导弹武器系统中得到广泛应用。目前激光二极管的功率已达 1.5W 左右。通过采用多异质结、量子阱及二极管阵列等技术，新一代激光二极管的功率及特性已能较好地满足点火及实用的要求，最高功率已达 10W。用激光二极管作为激光源的点火和起爆研究也得到了不断发展。随着激光二极管输出功率和能量的提高，其在激光点火与起爆技术领域将占有越来越重要的地位。

4. 光纤及连接器

1) 光纤

光纤作为传输激光的载体，在激光二极管点火系统中具有举足轻重的作用。目前使用的多是石英玻璃材料制造的光纤，分为阶跃折射率光纤和渐变折射率分布光纤两种。在阶跃折射率光纤中，纤芯的折射率是常数，而在渐变折射率分布光纤中，纤芯折射率由纤轴心沿径向方向向外逐渐减少，因此这种光纤具有自聚焦的特性，可以提高激光输出的功率密度，而激光功率密度的提高对激光二极管点火是十分有利的。光纤芯径对火工品点火有直接影响，光纤芯径对 1#点火药的功率阈值的影响如表 4-3 所示。

表 4-3 光纤芯径对 1#点火药的功率阈值的影响

点 火 方 式	光纤芯径/ μm	功率阈值/W	标准偏差
光窗式	100	0.777	0.133
	62.5	0.546	0.052
光纤直接接触式	100	0.201	0.042
	62.5	0.175	0.033

由表 4-3 可知，与光纤芯径为 100 μm 的激光器相比，芯径为 62.5 μm 的激光器点火功率阈值，在光窗式和光纤直接接触式两种点火方式下分别降低了 30%和 15%。这说明减小光纤芯径可增大激光功率密度，减小点火功率阈值。

2) 光纤连接器

光纤连接器是用在光纤—光纤之间可拆卸的器件，可把光纤的两个端面精密对接起来，以使发射光纤输出的光能量能最大限度地耦合到接收光纤中，并使由于其介入光链路而对系统造成的影响减到最小。插入损耗和回波损耗是衡量光纤连接器产品质量的主要光学性能指标。插入损耗是指接续的连接器给系统造成的光功率衰减，主要由相接续的两根光纤之间的横向偏离造成；回波损耗是用来衡量从连接器反射回来并沿输入通道返回的输入功率分量的量度。光纤连接器在多次插拔之后其插入损耗将增加，通常 5000 次插拔之后增加量应小于 0.2dB。

5. 激光点火器

1) 结构形式

在激光直接引燃药剂点火方式下，激光点火器结构形式有以下三种：

(1) 光纤直接接触式。

与激光器相连的光纤直接密封进点火器，光纤与药剂的耦合方式为直接接触。对于光纤、药剂、壳体，关键要解决密封性问题，可通过在药剂表面加盖片和壳体封接实现，见图 4-22。

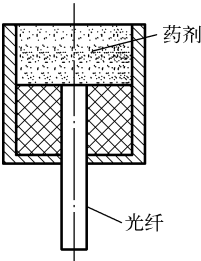
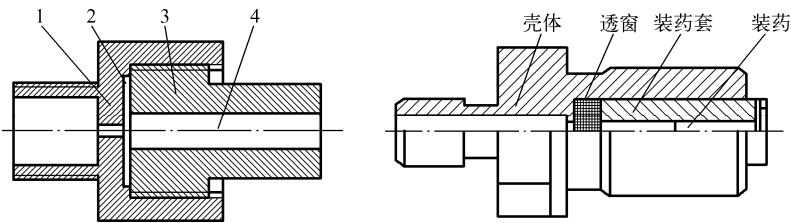


图 4-22 光纤直接接触式激光点火器结构示意图

(2) 光窗式。

将光学窗口与点火器壳体进行封接，可以获得高强度、高密封性的点火器，能够实现点火器与光纤接头的直接连接。加膜光窗式是在药剂和光窗之间加入具有绝缘隔热作用的薄膜，可使激光点火的阈值能量降低，其结构如图 4-23 所示。



1—底座；2—光学窗口；3—壳体；4—药剂。

图 4-23 光窗式激光点火器结构示意图

(3) 微透镜下的光窗式。

直接接触式光纤直接插入药剂中，点火能量损失较小，而光窗式中激光经过

光纤输出后还要透过光窗才照射到药剂表面,其中光窗会使激光能量有一定损失,在光窗与光纤接头及光窗与药剂之间存在空气隙,对光能也有衰减,且光纤具有一定的发散角,激光束从光纤接头出来后再经过光窗折射,光斑变大,降低了激光的能量密度,增大了点火阈值功率。因此,在光窗式耦合中加入微透镜,可实现光纤通过微透镜和光窗与药剂更好地耦合,减小了光斑尺寸,提高了激光点火的功率密度,从而降低了点火阈值功率,提高了系统的能量转换效率,其结构如图 4-24 所示。

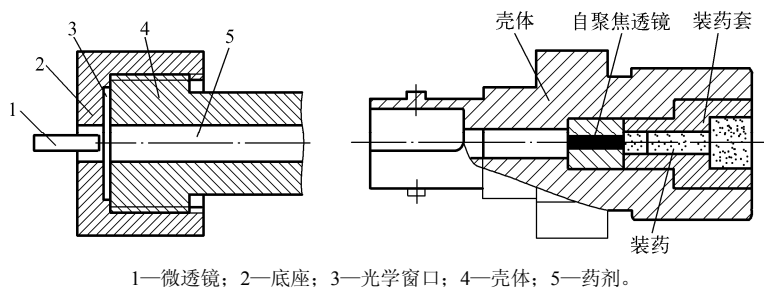


图 4-24 微透镜下的光窗式激光点火器结构示意图

2) 激光点火器装药选择

激光点火器中的点火药首选 B/KNO_3 , 其他的还有 $Ti/KClO_4$ 、 $B/BaCrO_4$ 等。在使用时对火药的配比、压药压力、粒度及掺杂需要进行设计。

近年来,美国、俄罗斯、印度等均在开展光敏炸药研究。其中研究较早的 BNCP (高氯酸顺式双(5-硝基-2H-四唑- N^2)四氨络钴(III))比较成熟,目前已经在许多火工品设计当中得到应用。国内陕西应用物理化学研究所在光敏含能材料方面也开展了较多研究,主要开展了 BNCP、高氯酸·四氨·双叠氮基合钴(III)(DACP)、高氯酸·5 胍基四唑汞(HTMP)等的合成及激光起爆感度研究。DACP 等药剂在特征敏感波长激光作用下,其爆能量可以实现数量级的降低。虽然光敏炸药能够降低激光起爆能量,但是存在机械感度高等安全性问题。

6. 激光点火与桥丝点火性能的比较

虽然激光二极管点火与桥丝点火同属于热起爆机理,但是药剂对于激光的吸收远快于普通的桥丝加热,因而激光二极管点火时间较短。药剂的激光二极管点火时间与桥丝点火时间的比较如表 4-4 所示。

表 4-4 药剂的激光二极管点火时间与桥丝点火时间的比较

药 剂	$Pb[Fe(CN)_4]/KClO_4$	$Ti/KClO_4$	B/KNO_3	$B/BaCrO_4$
激光点火时间/ms	0.42	1.2	2.8	38
桥丝点火时间/ms	4.16	4.16	31.2	20

从表 4-4 中可以看出,除 $B/BaCrO_4$ 外,其他几种药剂的激光二极管点火时间都明显短于其桥丝点火时间,这说明对于大多数药剂来说,激光引燃药剂确实是一个相当快速的过程。即使对于 $B/BaCrO_4$,在改善其对激光的吸收能力之后,其激光二极管点火时间也会短于桥丝点火时间,这是激光二极管点火比桥丝点火具有优越性的一个重要方面。另外,对于类似 $Ti/KClO_4$ 和 B/KNO_3 等钝感药剂而言,当用桥丝直接点火时会出现大量的断桥瞎火现象,点火成功率往往只有 20%。但使用激光二极管点火时则不存在这种现象。

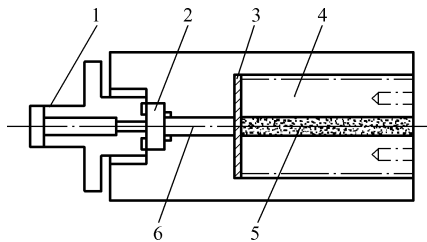
4.3.3 激光起爆技术

高能炸药的激光起爆通常有三种形式:第一,激光直接与高能炸药作用,这一方式与桥丝式电雷管作用类似;第二,激光通过炸药表面的薄金属膜的快速加热而作用,这一方式与 EBW 式电雷管作用类似,其激光能量使用效率较低,不适合作起爆之用;第三,激光通过烧蚀一金属箔产生一高速飞片撞击高能炸药而作用,这一方式与 EFI 的作用过程类似。三种结构不同,其作用机理也不相同。

1. 激光直接起爆炸药技术

与激光点火器相比,激光直接起爆炸药的雷管结构和装药要复杂得多。使激光雷管实现爆轰输出有以下两种途径。第一,用激光点燃起爆药完成爆燃转爆轰,这类似于目前的电桥丝雷管。尽管这种方法比较容易实现,但敏感的起爆药会增加激光雷管的感度,从而在一定程度上削弱了激光雷管的优势。第二,采用全猛炸药的爆燃转爆轰结构,尽管工艺比较复杂,但它维持了激光雷管钝感的特点,有益于生产和使用。实现爆燃转爆轰首先要保证激光点燃点火药后,形成高温高压气体,并同时保证点火后的器件不泄漏,具有结构完整性。所以,激光雷管通常采用窗口式结构。

窗口式结构激光雷管通常由窗口、点火药(高密度 HMX)、约束片、转换药(低密度 HMX)四部分组成(见图 4-25)。



1—光纤接头; 2—窗口; 3—约束片; 4—转换药套筒; 5—转换药柱; 6—掺炭黑的点火药柱。

图 4-25 激光雷管示意图

雷管的作用过程分为点火和爆燃转爆轰两个阶段。点火药的前端由密封窗口约束,后端用约束片约束。吸收激光能量后的点火药将在约束环境中燃烧,生成

高温高压气体，直至约束片破裂。破裂的约束片将对转换药快速压缩，形成冲击波并实现爆燃转爆轰。

1) 窗口材料

激光雷管使用的窗口材料通常有蓝宝石和 P 玻璃两种。由于蓝宝石具有高强度和优越的透光性，所以早期的窗口都使用蓝宝石，但蓝宝石极高的热导率将使激光雷管的热损失增大，并导致起爆阈值相对较高。另外，使用蓝宝石作窗口材料时，封接工艺相对较复杂，主要原因是不锈钢壳体的热膨胀系数远大于蓝宝石窗口，封接完成后，经常能观察到由于残余热应力所产生的裂缝。目前，使用较多的是另一类具有低熔点、高热膨胀系数的 P 玻璃窗口。P 玻璃热导率比蓝宝石小 80 倍，折射率也小于蓝宝石，可大大降低激光通过后的发散程度及含能材料的热损失。而 P 玻璃的强度也能满足激光元件窗口的要求，密封相对容易，对其表面做简单的抛光处理就能具有良好的透光性。

2) 约束片

约束片有两种作用：首先是对点火药约束，使之完全燃烧成高温高压气体。其次起加速片作用，一旦被点火段的高温高压气体切断，该约束片将快速进入转化段药中，其压缩作用将形成冲击波，并使爆轰成长区缩小。因此，约束片材料必须具有高强度、轻质量的性能。由于厚度为 0.25mm 的钛合金可以对点火段提供足够的约束，同时质量较小，有益于形成高速飞片，比较适合于爆燃到爆轰的转换，所以，约束片应采用 Ti-Al 钛合金。转化段的作用是形成冲击波后快速完成冲击波向爆轰波的过渡转换。根据爆轰理论，药剂具有较大空隙度时，有利于热点形成。

3) 转换药

密封型激光雷管的爆燃转爆轰过程主要由点火段和转化段两步完成。该雷管全部使用 HMX 猛炸药，其中使用掺入 3% 炭黑的 HMX 混合物，作为点火段装药。对吸收和传递激光而言，点火药的空隙度不宜太大，一般选用的密度为 1.55g/cm^3 。转化段必须选择低密度装药，例如，使用密度为 1.16g/cm^3 的 HMX 粗粒药剂（平均粒径为 $150\sim 200\mu\text{m}$ ）。

4) 激光器

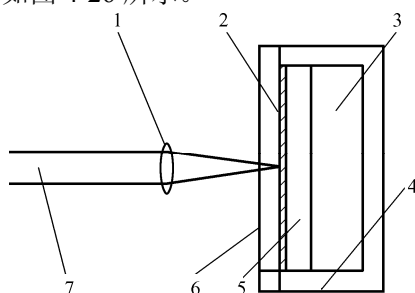
用激光二极管完成 HMX 的点火和起爆的作用时间一般都在毫秒量级，作用的迅速性是可靠完成所需功能的基本要求。激光能量密度的大小决定着作用时间的长短，因此，提高能量密度是降低作用时间的关键。由于固态激光器的输出远大于激光二极管的输出能量，因此可作为引爆激光雷管光源。目前可供选择的激光器有钕—玻璃激光器、钕—YAG 激光器和钛—蓝宝石激光器。由于要求作用时间小于 $50\mu\text{s}$ ，激光器在这一时间内的初始输出才是有效的能量。研究结果表明，由于钕—玻璃激光器早期能量沉积少，不能满足要求，为降低雷管作用时间，只能使用钛—蓝宝石和钕—YAG 激光器。

2. 激光通过金属膜快速加热

激光点火直接作用在一层铝膜上，使其汽化至等离子化，冲击炸药起爆。因此，作用时间短，需要的功率密度大。目前桑迪亚实验室相关理论工作和试验研究进展顺利，但工程化和小型化遇到不少困难。主要是装置运行的热环境和力学环境适应能力都很差，系统组件小型化方面也存在不相当的难度。其中激光器的小型化问题一直得不到很好的解决，同时光纤的损伤概率也比较大。

3. 激光驱动冲击点火

激光驱动冲击点火是美国能源部在原来电驱动冲击片点火基础上发展起来的一种新型拍击式点火方式，英文简称“Slapper”。它利用了激光的优良性能以及光纤技术方面取得的成果，因此被公认为最有前途的点火方式。以这种方式构造的激光飞片雷管结构如图 4-26 所示。



1—聚焦透镜；2—金属膜；3—炸药；4—容腔；5—空气隙；6—窗口；7—激光束。

图 4-26 激光飞片雷管结构示意图

它的基本原理是：利用激光直接作用于金属膜，激光能量将烧蚀金属膜前表面部分，金属膜会迅速汽化形成一个强度极强的高温等离子体，驱动金属膜的后表面部分形成一定速度的飞片，加速冲击炸药。其金属膜的厚度一般在微米量级，点火所需功率密度为 GW/cm^2 。美国桑迪亚国家实验室和 Los Alamos 国家实验室均在此方面做了大量试验。目前，激光器一般采用 10ns 脉宽的钕—YAG 激光器，金属膜选用铝和铜，金属膜直接沉积在光学衬底或光纤端部，光纤直径一般在 0.2~1.0mm 之间。2000 年，桑迪亚国家实验室在 0.4mm 芯径的端部沉积数十微米厚度的铝膜，激光能量为 30mJ，照射 80ns 后，测得飞片速度为 3km/s，激光能量转化率为 35%。

我国在激光驱动飞片起爆技术方面取得了很好的成果。2000 年，中国工程物理研究院用钕—YAG 激光器驱动厚度 $5.5\mu\text{m}$ 的铝飞片，飞片速度达 6km/s。2001 年，利用激光驱动飞片冲击引爆了密度 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 、直径 5mm、高度 5mm 的 PETN 药柱，随后又冲击引爆了密度为 $1.57\text{g}/\text{cm}^3$ 的细颗粒 HNS 炸药。

1) 薄膜设计

在实际设计中，通常采用复合薄膜代替单一铝膜以控制真实的飞片厚度和提高飞片速度。

一种薄膜结构如图 4-27 所示，包括发射层、能量截止层、飞片三层结构。飞片的作用是吸收、转化激光能量并向能量截止层单向泄放，可以采用铝、铜等材料。能量截止层的作用是反射激光和飞片能量转换产生的光和热。对于铝飞片，可将铝氧化成三氧化二铝作为截止层；对于铜飞片，需另外制作能量截止层。发射层要保证入射激光的能量损失最小，还要反射来自飞片和能量截止层的光能，因此应具有激光的单向通过性，可以采用光纤端面精密研磨、镀光学增透膜等措施实现。

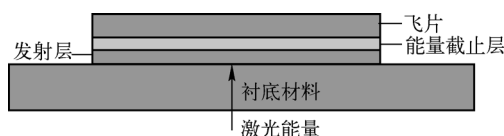


图 4-27 薄膜结构示意图

例如：在金属沉积层之间再沉积一介质层（小于 $0.25\mu\text{m}$ ），构成一层铝膜、一层 Al_2O_3 膜和一层铝膜的复合结构。

当激光照射时，激光烧蚀将会在介质层上停止，从而准确地控制飞片厚度。这一 Al_2O_3 介质层虽不能阻止金属膜材料的熔化和等离子体穿透，但能极大地延迟热扩散效应，从而提高飞片加速所需的能量。试验证明，这种复合薄膜可使激光能量转化效率达 50%（飞片动能/激光能量）。在中、低入射能量下，复合薄膜能一致地使高能炸药起爆。

2) 装药选择

在直列式传爆序列规定的许用炸药中，PBXN-5、PBX-9407 等药剂的冲击波感度与撞击感度呈同一趋势，但 HNS 药剂却是个例外，即撞击感度低时，其冲击波感度却较高，因此，它是激光飞片雷管最适合的药剂。在激光起爆炸药的三种方式中，只有激光驱动飞片方式能迅速起爆 HNS，所以，它是唯一满足现代引信快速响应及钝感化要求的技术。

但目前的激光器的尺寸、成本和能量等诸方面性能均不能适用绝大多数武器系统，未来的激光器发展将会确保激光起爆技术成为一个实用的技术。将来具体选用激光飞片雷管还是冲击片雷管，这依赖于特定的引信要求。

4.4 MEMS 火工品技术

机电系统（Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS），是指将微结构的传感技术、致动技术和微电子控制技术集成于一体，将机械和电子器件融合在单个芯片（如基于 Si 材料）上，形成同时具有“传感—计算（控制）—执行”功能的微型装置或系统。火工品作为武器系统的首发元件，在较小的外界能量刺激作用下激发，完成作用，实现预定的功能。随着武器微型化的发展，机电电系统

(MEMS) 火工品备受关注,它是指基于 MEMS 技术或与 MEMS 工艺兼容的火工品,其尺寸特点为换能结构和药剂结构尺度在微米量级,核心器件尺度在亚毫米量级,系统尺度在毫米量级的火工品,采用 MEMS 封装工艺,将微发火电路、微作动机构、微换能元、微装药、微序列集成一体,其主要特征是结构微型化、换能信息化和序列集成化。MEMS 火工技术使得在具有厘米或毫米尺寸的火工系统芯片上能完成火工动力源、矢量推动、点火序列或传爆序列的安全与保险等功能。基于 MEMS 火工技术制造的火工系统模块不仅具备传统火工品的控制、点火、做功等功能,还具有更高的精度、更高的可靠性、更高的安全性,更能满足未来火工系统微型化、集成化、数字化和智能化的发展需求。因此, MEMS 火工器件也被视为继敏感火工品和钝感火工品之后出现的第三代火工品(火工集成)。

MEMS 火工品相关技术自 20 世纪后期开始有报道,国外主要研究单位有美国微组装技术(MAT)公司、法国国家科学研究中心、新加坡国立大学机电学院和韩国科学技术研究院等。其中,美国以可替代 M100 电雷管的 MEMS 火工品为目标,重点开展 MEMS 换能元的结构设计,研究低能发火性能的影响因素,并将微型传爆序列和微电子机械系统引信的安全和保险装置列入预研计划;其他国家则侧重于微推冲序列的换能元设计,重点开展其作用性能、特征参数表征研究。

4.4.1 MEMS 火工器件特点

相比传统的火工品,采用了 MEMS 技术的火工集成模块(芯片)具有以下特点。

1. 微型化

以微机械加工技术为核心的 MEMS 设计加工技术能够使 MEMS 产品尺寸达到微米甚至亚微米的量级。因此,基于 MEMS 技术的火工器件尺寸小、重量轻,能够适用于多种微型推冲器列阵、微型气动装置和微小尺寸弹头的微型点火序列或微型传爆序列。

2. 集成化

MEMS 所用材料主要包括结构材料、压电材料、导电材料、绝缘材料和记忆材料,如单晶硅、二氧化硅、氮化硅、硅锗晶体、锆钛合金、铝、铜等。由于这些材料均具备良好的机械性能或电气性能,因此,制造火工集成模块(芯片)的工艺方法与制造集成电路和微机电装置的方法基本相同,即在玻璃、硅片或其他基片上重复进行光刻、掩膜、蚀刻、镀膜和微型注药等工艺,将各功能单元集成到微小尺寸的火工系统模块(芯片)上以完成控制、做功等功能。

3. 数字化

数字化就是将连续过程(模拟量)离散化为许多不连续和独立的过程(数字量),通过这些不连续的过程模拟和仿真连续过程。集成了数字电路的火工系统模块(芯片),能够用一系列相互独立的火工事件来完成一个或多个连续的火工动作

过程，由于数字量相对独立而不易受电磁、光、热等外界刺激的干扰，可以精确地完成连续过程，使得火工系统模块（芯片）具有更高的精度、更高的可靠性和更高的安全性。

4. 智能化

由于 MEMS 可以将数字电路的应用和微型传感器、微型处理器、微型执行装置及接口电路等集成于一体，因此，基于 MEMS 的火工系统能够收集外部物理场信息，并将处理结果传递给执行装置，根据外部物理场变化来自适应地对受控对象进行运动姿态控制。

4.4.2 MEMS 火工技术应用

1. 微型点火器

法国研制出了一种基于 MEMS 的新型微型电子—热力学火药点火器。微型点火器在系统准备好发火之前，通过将两个电路板接地来保证其处于安全模式。由于有了集成 MEMS 开关，系统可在发火前一刻解除保险，确保了平时的安全性。其基本结构是以新一代 MEMS 热力学—机械开关为核心，它们布局在同一个芯片上，分布在火药微型点火器周围。得益于该结构设计和 MEMS 技术，该系统可用最少的电能，以安全、保险可靠的方式引燃任何火药。研究人员还制造出首个演示样机，以演示所提出的概念并证明了其功能可靠性。该开关工作时需要持续时间为 500ms、功率为 350mW 的电流。起爆器的不同起爆状态如图 4-28 所示。

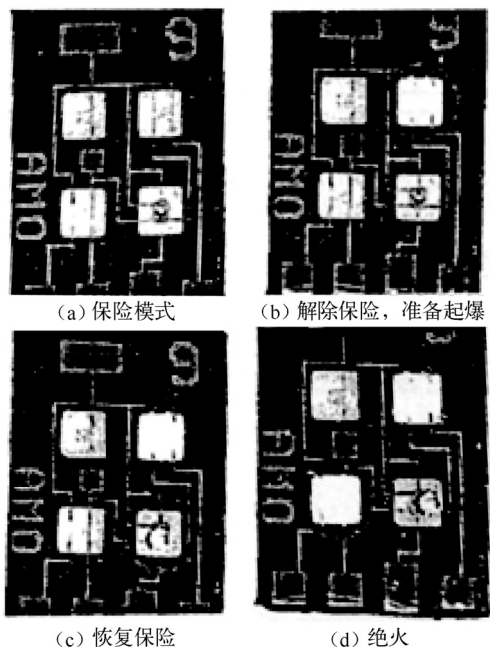


图 4-28 起爆器的不同起爆状态示意图

2. 微型推冲器

MEMS 技术在航天方面的应用主要是指微型火箭（推冲器）列阵，其研究的背景就是快速推进微型卫星姿态控制、天线动力源及微型战场传感器（机器人）的应用。

图 4-29 所示为一种“数字化”微型推冲器列阵芯片的示意图。这种列阵芯片具有三层结构，其中上层为喷孔层，中层为装药及装药室，下层为点火电桥层。装药采用斯蒂芬酸铅或者 HT-PB/AP（端羟基聚丁二烯/高氯酸铵）复合推进剂。微型推冲器列阵芯片是通过不同单元推冲器的脉冲推力完成卫星的姿态控制和天线的伸展运动。相比于固体推进剂微型推冲器，这种“数字式”微型推冲器的装药更简单、尺寸更小、更利于集成、更可靠更安全。

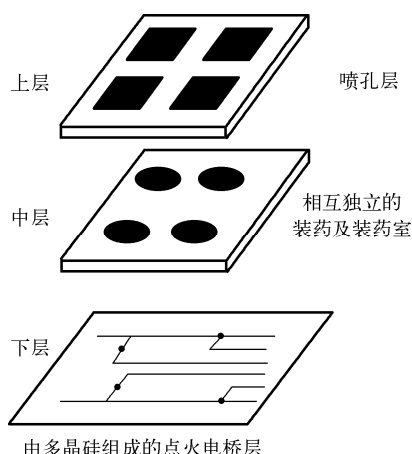


图 4-29 微推冲器结构示意图

法国国家科学研究中心公布微型推冲器的制作工艺：首先在硅片或其他基片上沉积 Ni-Cr 合金或在硅片上掺杂 P 形成具有点火作用的桥，并将点火桥悬空，以便点火桥可以埋入推进剂中；然后采用约束电化学蚀刻或约束光化学蚀刻的细微加工方法，在石英玻璃片等基片上制造出具有一定深度和容积的推进剂药室；最后通过掩膜和离子蚀刻或化学蚀刻的方法在硅或 SiC 基片上制造出具有密封结构的喷孔。为了确保小尺寸下燃烧的稳定性，多采用真空或沉积方法向药室注装推进剂，而且推进剂多选用具有快速点火和燃烧能力的药剂，如斯蒂芬酸铅。

目前，微型推冲器列阵技术已日趋成熟，即将走向规模化应用，未来 10 年，MEMS 技术将更进一步应用到微型火箭、微型卫星、微型航天器的姿态控制、点火分离等方面。

3. 微型安全及起爆控制装置

MEMS 由于其具有体积小、质量小、低成本、低功耗、抗高过载、可靠性高、可测量多种物理量等优点，非常适于制作战术导弹灵巧引信。作为其冲击、惯性、

流量、压差等多种物理量的测量传感器，可精准测量导弹参数和环境的各种变化，从而提高引信工作的安全性、可靠性、适应性和灵活性。

美国、法国和英国都开展了这方面研究。图 4-30 为美国海军正在进行的 MEMS 鱼雷引信的研究项目，MEMS 应用于鱼雷引信的信息传感、起爆及安全保险装置等子系统中，能够切实解决鱼雷在恶劣条件下安全运输、勤务处理、保险与解除保险及可靠起爆的问题。预计第一代产品将缩小至传统引信体积的 1/17，全生命周期成本降低 3/4。

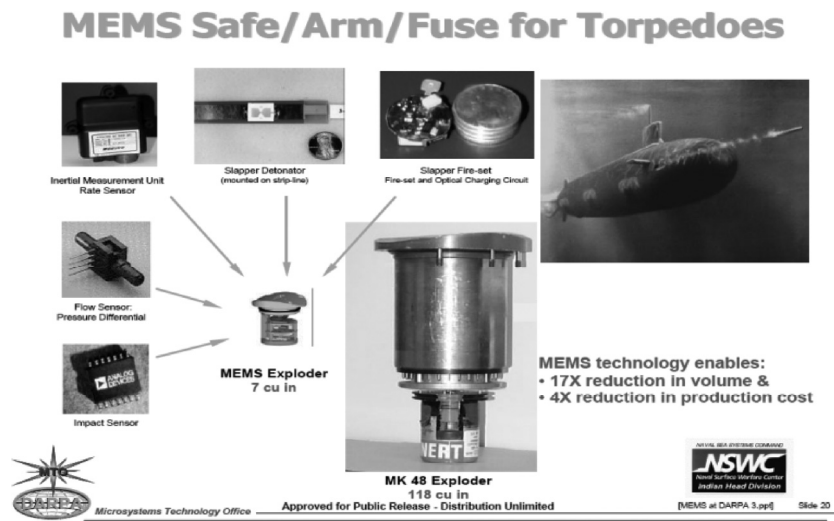


图 4-30 MEMS 鱼雷安全引信

美国联合可编程引信 FMU-152A/B 是具有近炸触发延迟等功能的可选择电引信，如图 4-31 所示。



图 4-31 FMU-152A/B 引信

美国坚固目标“灵巧”引信：FMU-159A/B 具有规避、钻地等功能；未来穿透型引信将会具有不同传感器，更小，更“灵巧”，并可能在两发弹之间实现通信，以决定是否攻击。其实物如图 4-32 所示。



图 4-32 FMU-159A/B 引信

美国陆军武器研发与工程中心（ARDEC）正在应用 MEMS 技术生产用于弹药引信系统的安全与解除保险装置，开发出一种新型微型爆炸序列装备。其前级输入装药的一部分，所有的其他传递和接收能量的装药，以及最终的输出装药，都采用了 RSI-007 炸药。该炸药是一种基于 CL-20 的造型药粉，由美国 Reynolds 系统公司应一份与美国海军签订的 SBIR 项目的要求研制成功。该炸药最初研制目的是用于高压冲击片雷管中，具有钝感特性。深入的测试和特性研究表明，该炸药是目前唯一一种具有特定直径、感度以及装填特性的已知炸药，可以在美国陆军武器系统中应用，满足上述 MEMS 尺寸规模的安全与解除保险系统的要求。

在导弹定向战斗部中，采用基于 MEMS 的火工器件，将给战斗部增加一些新的性能。图 4-33 为起爆分散式系统的引爆装置，该装置依赖于解保控制单元，来决定最佳作用方式。如一排引爆装置或分段顺序上的引爆装置，可以控制战斗部在特殊方向上起爆，以引导爆炸能量的输出。MEMS 技术的应用，大幅度提高了新一代武器的灵活性，并为开展多功能化和智能化设计提供了可能。



图 4-33 起爆分散式系统的引爆装置

本章小结

本章介绍了主要新型火工品技术相关内容。内容涉及半导体桥起爆点火技术、直列式起爆点火技术、激光起爆点火技术及 MEMS 火工品技术。本章着重说明了现代火工品技术的发展动力及需求，新型火工品的结构、组成及工作过程，并介绍各种新技术的主要优势和特点。本章内容对开拓学员知识面、培养学员跟踪导弹火工品新技术的能力有重要作用。

思考题

1. 简述半导体桥火工品的结构及工作原理。
2. 与隔断式传爆序列相比，直列式起爆技术的主要区别是什么？
3. 激光二极管点火系统由哪几部分组成？
4. MEMS 火工品技术的突出优点有哪些？

第5章 火工品固有安全性

火工品是可在预定激励作用下激发、产生燃烧或爆炸效应，从而完成特定功能（如点火、传火、起爆、传爆、推冲器等机械做功或产生特殊效应）的一次性作用元器件或装置的总称。火工品是弹药中的首发部件和始发能源，敏感度高且易燃、易爆，在生产、使用过程中容易发生危险，尤其是装配到弹药中后易引发重大事故，因此研究火工品安全性至关重要。火工品安全性既取决于固有安全性，也涉及环境安全和操作使用安全等方面。本章着重从火工品药剂安全、火工品安全设计及供电安全等环节，介绍火工品固有安全性相关内容。

5.1 火工品药剂安全

5.1.1 火工品药剂的不安定因素

火工品药剂一般都具有特殊的不稳定结构和爆炸性的功能基，根据物质的化学结构，爆炸性物质有以下几种：

- (1) N-O 结合物，如硝酸酯（ $-\text{ONO}_2$ ）类化合物、硝基（ $-\text{NO}_2$ ）化合物、亚硝基（ $-\text{NO}$ ）化合物及氨基硝酸盐等。
- (2) N-N 结合物，如重氮基盐、金属叠氮化合物及叠氮氢酸等。
- (3) N-X 结合物，如卤化氮、硫化氮等。
- (4) N-C 结合物，如氰化物等。
- (5) O-O 结合物，如有机过氧化物、臭氧化物等。
- (6) 氯酸类或高氯酸盐类化合物，如氯酸酯、高氯酸酯、重金属高氯酸盐、氨基高氯酸等。
- (7) 乙炔及乙炔重金属盐。

正是由于上述不稳定结构和爆炸性功能基的存在，在外界能量及环境条件变化的刺激下，会引起炸药发生化学反应，释放出能量。按反应的速度及传播的性质，炸药化学变化过程有三种基本形式，即热分解、燃烧和爆轰。

5.1.1.1 火工药剂的热分解

炸药的热分解，是指在热作用下，炸药分子发生分解的现象与过程。如对于 CHON 类炸药，热分解是分子中最不稳定的那部分键断开，生成分子碎片和气体

分解产物二氧化氮。

在一定温度下，炸药分子处在相对稳定状态。这时，只有较少量的分子因为具有某些多余能量（活化能）而能分解。当温度低时，活化分子数目少，但随着温度的升高，活化分子数目将增多，从而分解速度也随之加快。

以黑索金为例，当完整的炸药分子受热后，首先在最薄弱处断裂，脱掉一个 NO_2 分子，同时形成分子碎片，如图 5-1 所示。

脱掉 NO_2 ，形成分子碎片是炸药热分解的最初阶段，称为热分解的初始反应，又称热分解的第一反应。从理论上分析，热分解的初始反应是单分子反应。在指定温度下，这种反应的速度值最小。它表示某一炸药的最大可能的热安定性，即表示在热作用下，炸药保持其物理化学性质不发生明显变化的能力。就第一反应的本质而言，以黑索金为代表的硝基化合物的热分解，可以认为是由 $\text{C}-\text{N}$ 、 $\text{N}-\text{N}$ 、 $\text{C}-\text{N}$ 等键断裂开始的。

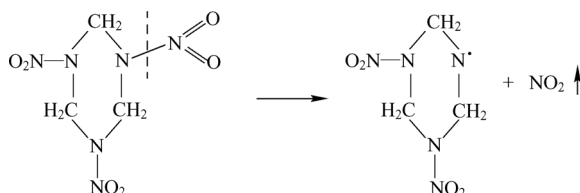


图 5-1 热分解第一反应示意图

初始反应形成的分子碎片是很不安定的，如在气相中，炸药热分解的初始反应形成二氧化氮、碳氢化合物的自由基。由于这些化合物或自由基化学性很活泼，它们之间可以进行一系列的反应，很快地再分解，可能发生下一步的变化，如图 5-2 所示。

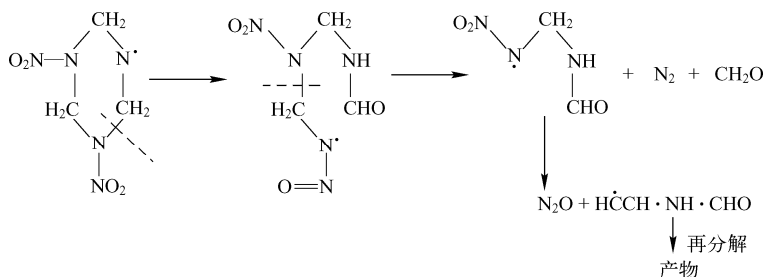


图 5-2 热分解第二反应示意图

上述过程示意地表示了分子碎片可能发生的分解过程。此外，由于初始反应形成的 NO_2 反应活性强，它可能与上述各过程形成的中间产物发生化学反应，进一步形成最终分解产物（如 H_2O ， CO_2 ， CO 和 NO 等），可用某些综合性的示意

通式来表达。例如，黑索金可写出



通常将炸药初始反应产物之间的一切反应称为炸药热分解的第二反应。热分解的第二反应是复杂的，明显地受外界因素的影响。如在热分解过程中，把氧化性的热分解气体产物排走时，就会使 NO_2 与分子碎片间化学反应的速度减慢。

5.1.1.2 火工药剂的燃烧

燃烧是火工药剂在火焰或电热的作用下所引起的较快的一种发热、发光的化学反应，称为炸药的燃烧（也称为爆燃），其速度常在每秒几毫米到数百米之间。燃速受外界条件的影响很大，随温度的升高，特别是随压力的升高而增大。燃烧的进行是以传热形式传递能量的。

燃烧过程在大气中进行得比较平稳，没有显著的音响效应。但在密闭或半密闭的容器中，如在火炮的药室内或导弹火箭发动机内，燃烧过程进行得很快，有明显的音响效应并能做推射功。炸药的燃烧在特定的条件下也可能转为爆炸。影响火工药剂燃速的主要因素有以下几点。

1. 炸药理化性质的影响

燃烧的稳定性及其燃烧速度，首先取决于化学反应速度及从反应区向原炸药层热传导的速度，如反应区中化学反应速度很快，而与它相对应的热传导速度很慢，则燃烧速度立即增快，甚至立刻发生爆轰，像叠氮化铅，它几乎没有燃烧阶段而立刻转为爆轰，就是这种情况。例如，化学反应速度过慢，反应放出的热量不能补偿由热传导造成的热损失时，则燃烧将逐渐减弱，直至熄灭。

炸药的导热系数对燃烧过程也有很大影响，如果炸药的导热系数过大，则大量的热量传入很深的未反应的炸药层中，增大加热层厚度使反应区的温度和化学反应速度降低，放热量减少，以致不能维持过程的自行传播。

炸药的挥发性对燃烧过程有很大的作用。易挥发性炸药，其沸点或升华点很低，因而燃烧反应在气相中进行，燃烧的性质取决于凝聚相的汽化和蒸气中化学反应的进展。这是沸点低的液态炸药的特有的形式。

2. 压力的影响

一般起爆药的特征是，在低压下能进行稳定燃烧。例如，压制的雷汞在 $p=0.4\text{Pa}$ 的低压下，仍能稳定燃烧，高压下易由燃烧转变为爆轰。叠氮化铅是个例外，它在任何条件下均不能进行稳定的燃烧，几乎在点火的同时就立刻转化为爆轰。大多数猛炸药在比大气压力稍高的压力下，仍可进行稳定燃烧。胶质状态火药，结构密实，能够在很大的压力范围内进行燃烧。一般炮用火药在几千个大气压下，仍能稳定燃烧。

大多数炸药都有稳定燃烧的压力界限。稳定燃烧的压力上限为炸药能保持稳定燃烧（不转为爆轰）的最高压力，当超过此压力时，炸药就不能稳定燃烧，将

由燃烧转变为爆轰。一般液态、粉状或低密度压装的炸药稳定燃烧的压力上限较低，而高密度压装、注装的特别是胶质炸药的压力上限较高。例如，粉状太安和黑索金稳定燃烧的压力上限为 2.5MPa；粉状梯恩梯和苦味酸稳定燃烧的压力上限为 6.5MPa；密度为 1.65g/cm^3 的太安稳定燃烧的压力上限大于 21MPa。

3. 装药密度的影响

炸药的燃速随炸药装药密度的增大而减小。

4. 药柱直径的影响

如果从炸药的一端引燃，则凝聚炸药的燃烧存在临界直径现象，即当直径小于一定值时，不能维持稳定燃烧，燃烧熄灭。燃烧的临界直径随炸药密度、燃速、外壳材料和厚度等条件而变化。

5.1.1.3 火工药剂的爆轰

火工药剂以每秒几百米到几千米的速度进行化学变化的过程称为爆炸。爆炸速度超过炸药中的声速。

爆炸开始阶段往往有个增速过程（个别的因起爆能量过大，炸药爆炸开始阶段也有个减速过程），至一定爆炸变化速度后，才稳定不变直至炸药爆炸完毕。将爆炸传播速度不随时间改变的爆炸称为爆轰。爆轰都以爆轰波形式传递能量，这时能量利用最充分。

火工药的燃烧转化为爆轰的条件有以下几点。

1. 药剂性质的影响

燃烧转变为爆轰最重要的因素是药剂的性质。一般来说，化学反应速度很高的炸药很容易产生爆轰。例如，各类起爆药，特别是氮化铅，由于反应速度极快（爆轰成长期很短），只要一点燃瞬时就能转变为爆轰。火药则相反，它的燃烧过程只有在极特殊的条件下，才发生向爆轰过程的转化，而一般的猛炸药则介于火药与起爆药之间。

2. 燃烧平衡的破坏

燃烧平衡的破坏是燃烧转变为爆轰的主要原因。只要燃速超过某一临界值，就会产生这种破坏。这种转变的关键条件是燃烧压力的增加。

1) 混合气体

如果混合气体在密封的管子中燃烧时，火焰则以不断增长的速度进行传播，使混合气体的压力逐渐增大；而燃烧面压力愈大，燃烧速度就愈快，密度、温度也随之提高，使各层气体反应速度更快，燃烧面前边的气体压力更高，从而形成一层一层的压缩波，压缩波叠加的结果，就形成了冲击波。随着燃烧传播时所形成的冲击波强度增大，燃烧也愈来愈大，在冲击波强度达到某一临界值的瞬间就发生爆轰。

2) 凝聚炸药

凝聚炸药的燃烧转变为爆轰的机理原则上和混合气体的燃烧转变为爆轰

的机理没有多大差别，但转变条件根本不同。设在燃烧的过程中，化学反应区内产生气体的速度为 u_1 ，排出气体的速度为 u_2 ，当 $u_1=u_2$ 时，燃烧是稳定的。如果 $u_1>u_2$ ，即产生的气体不能很快排出，这时平衡即开始被打破；当 $u_1\gg u_2$ 时，燃烧反应区内压力急剧增大，燃烧速度急剧加快，最后燃烧转变为爆轰。

炸药装入壳体中，有助于燃烧转变为爆轰。因为装入壳体后造成炸药的燃烧在密闭或半密闭环境中进行，产生的气体排出受到壳体的阻碍，燃烧气体平衡受到破坏，使燃烧反应区压力增高，燃烧加快，而有助于燃烧转变为爆轰。

3. 燃烧面的扩大

燃烧面的改变可以破坏燃烧的稳定性，促使其转变为爆轰。因为这时单位时间燃烧的炸药量也要成比例地增加，使燃速加快，燃烧温度增高。燃烧速度或燃烧温度达到某一程度时，燃烧就会转变为爆轰。风可使燃烧速度加快，也有助于爆轰的形成。

5.1.2 高安全火工药剂

要提高火工品的本质安全程度，改善火工药剂的感度指标是重要的途径之一，这主要包括研发各种特征感度药剂、钝感药剂和超细化药剂。近年来，国外在合成新型安全钝感单质起爆药（如多硝基苯类耐热起爆炸药）的同时，还对常用传爆药和耐热炸药进行细化和钝化，包括对 RDX 和 CL-20（六硝基六氮杂异伍尔兹烷）和六硝基芪（HNS）等的超细化处理，以进一步提高其安定性，尤其是实现高温高压环境下的使用安全。

5.1.2.1 钝感药剂技术

随着对钝感弹药的要求不断提高，国外火工药剂安全性技术发展的主要方向是钝感和高能化。20 世纪 90 年代初期，美国海军开发了 PBXN-5、CH-6 及 PBXN-7 等系列传爆药，但是，此类传爆药仍存在种种问题而不能完全满足使用要求。为此，美国提出了开发新型传爆药的计划，目标是开发一种输出能量高于 PBXN-7，而钝感性能至少要与其相当的新型传爆药，最终研制出了 TNBFI、LLM-105 等新型热安定或高能钝感传爆药。瑞典也研制了极具应用潜力的 GUDN 配方。这些新型钝感药剂包括钝感起爆药、点火药、传爆药及延期药等。

1. 钝感起爆药

当前，起爆药技术的发展重点已从敏感类起爆药的合成逐步转向安全钝感类、耐热类起爆药的合成，基本要求是在保持原有的输出能量的前提下，进一步改善钝感特性，从而提高系统的安全性。

美国海军水面战中心印第安岬分部与太平洋含能材料研究公司研究人员联

合开展了安全性能好于斯蒂芬酸铅的无铅、无毒且环保型起爆药的研究。最具代表性的产品为 7-羟基-4, 6-二硝基-5-氢-苯并呋咱的钾盐 (KDNP)。从其安全性能数据可以看出, KDNP 的摩擦感度、撞击感度和静电放电感度均低于常规斯蒂芬酸铅 (NSL)。

美国洛杉矶“白杨”国家实验室高能炸药科技部的动力与含能材料分部等部门研究人员于 2006 年合成出了 5-硝基四唑-N²-高铁酸盐起爆药, 起爆感度可控, 在 250℃ 以下能够长期保持稳定。

2. 钝感点火药

瑞士国防部研究人员采用新型还原剂开展高能钝感点火剂配方研制工作。在该研究中, 研究人员以高氯酸钾为氧化剂并采用铅—铝合金 (铅含量分别为 53% 和 75%) 为还原剂配制了两种不同的点火剂配方。之后, 研究人员对上述配方的撞击感度、摩擦感度和静电放电感度等安全数据进行了试验研究, 从测试结果中得出, 铅含量为 53% 的点火剂配方的撞击感度、摩擦感度和静电放电感度均低于铅含量为 75% 的配方。与传统配方相比, 这类点火剂对外界刺激的感受度更低, 反应热更高。

德国黛米特·诺贝尔公司申请了一项美国专利 (USP6997998), 该专利介绍了一种无铅和无钡的点火药, 由无铅、无钡起爆药和作为供氧物质的过氧化锌混合而成, 具有较高的安定性且不含有毒物质, 配方中含有 5%~70% (质量) 的起爆药和其他组分 (如敏化剂、还原剂、炸药和惰性物质等)。该发明中的点火药最大特点在于, 储存在潮湿或温暖的场所时, 其安定性较好。

3. 钝感传爆药

在热安定传爆药配方研制方面, 美国发明了一种新型热安定传爆药。该传爆药采用的炸药是 2, 4, 7, 9-四硝基-10H-苯并糠醛[3, 2-b]呋唑 (TNBFI), 该炸药克服了传统药剂的种种不足 (如特屈儿的热安定性差等问题)。采用典型的 12A 型落锤感度仪测试结果显示, 摩擦极限感度大于 36kg, 火花间隙钝感。

在高能钝感传爆药方面, 美国研制出 2, 6-二氨基-3, 5-二硝基吡嗪-1-氧化物 (简称 LLM-105) 新型炸药。LLM-105 的性能和钝感性均介于 HMX 和 TATB 之间, 能量是 HMX 的 85%, 比 TATB 高 15%。LLM-105 具有热安定性, 对撞击、静电火花和摩擦均具有钝感性, 其撞击感度接近 TATB。这些综合性能足以说明 LLM-105 是一种高能钝感材料。

二硝酰胺脒基脲 (简称 GUDN) 是一种极钝感的含能材料, 瑞典防务研究院 (FOI) 已证实, GUDN 是一种高能炸药, 在大药柱中作传爆药时会产生爆轰, 最大理论装药密度时的爆速约为 8200m/s, 其密度为 1.67g/cm³, 因此 GUDN 的爆炸性能高于 TNT。而最令人关注的是, 随着 GUDN 含量的提高, 相关配方所产生的性能与钝感性就会相应提高。

2007 年, 美国海军公布了由其武器实验室开发的传爆药 PBXW-14 的鉴定试

验结果。PBXW-14 是一种 HMX/TATB/黏合剂基钝感传爆药，从现有的测试结果可以看出，其稳定性和安全性均优于包括 PBXN-7 在内的其他传爆药；通过爆速、临界直径、真空热安定性等参数的比较，可以认定 PBXW-14 的性能优于 PBXN-7，其摩擦感度、静电感度和撞击感度与 PBXN-7 相当。

4. 钝感延期药

钝感延期药在实际应用过程中需要可靠和精确的延期药组分，但燃烧过程中往往受到含能材料的粒度、含量、环境压力与温度等内外界条件影响。为此，国外近年来围绕延期药的安全开展研究，并取得一定成果。比如美国海军在完善 MKI41 延期药柱生产工艺的同时，提高了硼—铬酸钡烟火延期药的使用安全。

5.1.2.2 新型微、纳米火工药剂技术

火工药剂的超细化（微/纳米化）已成为提高火工药剂安定性的重要途径。美国是最早开展相关研究的国家，现已取得了大量的成果，推出了多种新型微/纳米火工药剂。这些纳米药剂有在原有 RDX、CL-20 等药剂基础上改进得到的微/纳米 RDX 和 CL-20，也有新型纳米含能材料，如亚稳态分子间复合物和亚稳态纳米含能复合物、纳米多孔硅、微/纳米铜和纳米铝热剂等。

1. 纳米 RDX 和 CL-20

P.Render 等人通过超临界流体技术得到颗粒为 70nm 左右的 RDX，其撞击感度、冲击波感度都较微米级 RDX 明显降低。美国 B.C.Tappan 等人采用的新制备方法得到的纳米 CL-20，其机械感度更低。

2. 纳米多孔硅

近年来，将纳米多孔硅用作起爆药的研究颇受重视。2000 年，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的研究人员在多孔硅基材上合成出了高能炸药 RDX 或 PENT 的纳米晶体复合材料，还利用溶胶-凝胶方法制备了纳米含能材料。

3. 纳米铝热剂

与常规点火药相比，纳米铝热剂基改性点火药的最大特点是在反应期间能够产生非常高的温度，更重要的是，这类聚合物能降低纳米铝热剂点火药的静电感度（ESD）。为此，美国提出由纯纳米铝热剂与能够产生气体的聚合物构成的一种纳米铝热剂改性点火药。纯纳米铝热剂的 ESD 值小于 1mJ，而聚合物改性纳米组分的 ESD 值则为 125mJ，同时还保持其特有的燃烧特性。如此高的 ESD 值使纳米铝热剂点火药可以避免任何意外静电刺激的点火。

5.2 火工品安全设计

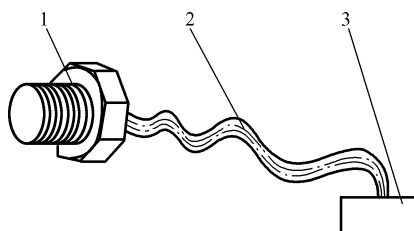
火工品安全技术是指减小火工品维护、使用等环节事故发生概率及事故损失的方法和手段，内容涉及新型高安全火工药剂及材料技术、运输及存储安全技术，以及安全性设计技术等。其中，安全性设计技术则是从技术层面开展火工品安全

研究，既包括安全编码技术、抗杂散电流技术、抗静电技术、抗射频技术、无起爆药技术等传统的安全设计技术，也包括爆炸箔点火与起爆技术、半导体桥点火与起爆技术、激光点火与起爆技术、电—热点火与延期技术和非电爆炸逻辑网络技术等技术先进的火工品技术。

5.2.1 安全编码技术

安全编码技术在导弹装备上有着广泛的应用，对于抑制人为及自然干扰，提高装备作用的安全性发挥着重要的作用。编码技术与火工品相结合，可构造出具有高安全性、高可靠性的灵巧火工品。

光电半导体桥火工系统是将半导体桥起爆与激光光纤相结合的一种钝感而具有低起爆能量的光电一体化火工品。该系统是控制系统通过激光器和光纤向爆炸装置发送编码光信号，爆炸装置中的光电转换装置通过信号识别，控制半导体桥火工品发火。光电半导体桥火工品示意如图 5-3 所示。



1—爆炸装置；2—光纤；3—控制系统。

图 5-3 光电半导体桥火工系统

光电半导体桥火工品作用原理是使用火工品内部的微型电路和光电转换装置，将来自光纤的光能转换成半导体桥药剂点火所需的低能量。这种装置由于是通过电绝缘光纤连接而使火工品与环境实现隔绝，因此只要保证火工品外壳的完整，就能经受极其恶劣的电磁环境。光纤的输入能量可使用激光二极管作能源，激光二极管的驱动完全依赖于外部的指令和控制系统。该系统是通过一光纤向终端发送一组编码光信号，通过各个分支光纤将信号送到每个起爆器。每个起爆器内部装有译码、定时、光电转换及控制电容器放电的固态微型电路，接收的激光信号先通过光电二极管向电容器充电，但直到接收一个正确编码的发火信号时，电容器才放电，使半导体桥火工品发火。该系统的优点主要有：系统的每个动作都可以有独立的保险/解除保险装置；系统具有钝感化、质量小等特点；能控制多个有次序事件的作用且动作迅速；满足直列式点火系统的安全性要求等。它是新一代武器、航天、航空等领域中可以广泛应用的采用多种能源集成、完全防静电、防射频和电磁辐射的安全钝感多功能起爆系统。

5.2.2 抗杂散电流技术

在导弹装备中，有大量的导电路路和电器设备，在使用过程中难免由于绝缘不良等原因而漏电，形成所谓杂散电流。随着战场环境的日趋恶劣，弹上设备日益复杂，要求提高导弹火工品抗杂散电流能力。

西欧国家为了提高雷管的抗杂散电流能力，提高了雷管的发火冲能。

瑞典早期生产的 TE 型电雷管全电阻为 $1.5\sim 2.0\Omega$ ，最大安全电流 0.3A ，发火冲能 $3\sim 5\text{ MW}\cdot\text{s}/\Omega$ 。该产品由于抗杂散电流能力差，国内禁止使用。为适应大面积爆破和改善抗杂散电流能力，更新为 VA 型雷管（瞬发、MS 延期、HS 延期），该雷管具有一定的防静电、抗杂散电流能力，提高发火冲能为 $80\sim 140\text{ MW}\cdot\text{s}/\Omega$ ，可耐静电 $2\,000\text{ pF}$ 、 15 kV （6m 导线），不发火。

德国代那迈·诺贝尔公司（Dynamite Nobel AG），将 A 型雷管（普通雷管）改为生产 U 型（钝感）、HU 型（特钝感）雷管，提高了耐静电和抗杂散电流性能，其性能列于表 5-1。

表 5-1 各种电雷管的耐静电和抗杂散电流性能

型 号	名 称	发火冲能/（ $\text{MW}\cdot\text{s}/\Omega$ ）		电流强度/A		防 护 对 象
		不发火	发火	不发火	发火	
A	普通雷管	0.8	3	0.18	0.3	
U	耐静电雷管	8	16	0.46	1.5	静电
HU	耐静电雷管	1100	2500	~ 4	25	雷、杂、静电

产生和影响杂散电流的因素很多，杂散电流的数值和方向因时间、地点而变化，有些地方，杂散电流只有几毫安，电位也不过几百毫伏；但有些地方，特别是在发射系统或飞行甲板，杂散电流可高达几百毫安甚至几安培，其电位达数伏至数十伏。显然，这样的电流已足以引爆普通的电雷管。如果应用一种能够抵抗杂散电流的电雷管，这些情况就都可以避免。使电雷管能够抗杂散电流，有很多方法，如在雷管中串联电容，采用电磁雷管，采用火花式电引火元件、导电药式电引火元件、低电阻桥丝式电引火元件等。用后两种电引火元件装配电雷管制成抗杂电雷管应用较多。

1. 无桥丝抗杂散电流毫秒电雷管

无桥丝抗杂散电流毫秒电雷管的特点是取消厂桥丝，而在引火药中加入乙炔、石墨、炭黑等导电物质做成导电性的引火头，这种引火头的电阻不是固定的，当外加电压小于额定电压时，其电阻值较大，通过电流小，不足以引燃引火药。当外加电压高于额定值时，其电阻下降，导致通过的电流变大，发热量增加，直到可以点燃引火药。无桥丝电雷管可保证在 5V 电压作用下 5min 不发火。这种电雷管不

能用动力电源和一般的起爆管进行起爆，要用专门设计的高能脉冲起爆器起爆。

2. 低阻桥丝抗杂电雷管

目前多采用紫铜丝制造低阻桥丝抗杂散电流电雷管。选用紫铜丝作抗杂电雷管的桥丝材料，变换不同直径，可以在一定范围内调整雷管的感度，以应用于不同装备的应用环境。目前一般直径在 $\phi 40 \sim \phi 80 \mu\text{m}$ 的范围内选定。

紫铜桥丝抗杂电雷管的结构和普通电雷管相同，只是桥丝材质不同，有抗杂电瞬发雷管、抗杂电秒延期雷管及抗杂电毫秒雷管等品种，其生产工艺与相应的非抗杂电的瞬发电雷管、秒延期电雷管和毫秒延期电雷管相同。

3. 导电引火药抗杂电雷管

采用导电引火药制造抗杂散电流电雷管，与普通电雷管的区别是电引火元件不焊桥丝，将导电药剂点抹在脚线分叉头上，制成引火药头。

4. 抗静电雷管的结构

非金属壳如纸壳、塑料壳电雷管管壳绝缘性强，具有一定的抵抗脚线与管壳之间的火花放电能力，一般不另外采取脚壳间抗静电措施。

金属壳电雷管管壳的电性强，易发生脚线与管壳（包括脚线药头与加强帽）之间火花放电，可引起药头发火及雷管爆炸，因此需要采用抗静电措施。抗静电措施可有多种方法，如在脚线药头与管壳之间设抗静电塑料套，采用半导体封口塞，封口塞中安装放电片或放电电阻等方法。目前多采用套绝缘套的方法。

在两根脚线之间放电，电流通过桥丝可使药头发火，因此药头药剂要选用合适的配方，不允许药剂太敏感。

5.2.3 抗静电技术

静电对电火工品的安全性和可靠性都有影响。解决桥丝式电火工品静电干扰的最好方法是使电火工品设计要具有防静电功能。从设计途径分析，一般有3种：第一，设计火工品内部绝缘系统，增加脚—壳间的绝缘强度，以保证在所要求的静电放电电压下不会被击穿，俗称“堵”静电方式；第二，使用对静电放电钝感的起爆药或点火药剂；第三，采用保护性静电泄放装置或材料，构成静电的泄放通道，俗称“泄放”静电方式，是目前采用最广泛的一种保护形式。

1. “堵”静电系列设计技术

1) 在易击穿位置设置绝缘环

由于火工品桥丝或脚线的边缘离管壳最近，且又是装起爆药或点火药的位置，因而是最危险的通道。增加脚—壳间的绝缘强度的目的在于提高这一通道的绝缘能力。通常是在桥丝周围增加一个绝缘强度较高的圆环或套筒，其绝缘材料通常是聚四氟乙烯、有机玻璃、酚醛塑料、聚氯乙烯等。例如，美国“响尾蛇”导弹触发引信用桥丝电雷管及苏联“萨姆”-7防空导弹引信用电雷管均采用了这一技术。

2) 药剂外表面涂绝缘膜

在点火药表面涂上绝缘强度高的硝基漆、有机硅漆及环氧树脂等绝缘体，或在点火药头外加聚氯乙烯绝缘套管，以增加药面与壳体之间的绝缘强度，继而提高产品的抗静电能力。

3) 使用绝缘材料管壳

产品的外壳直接由绝缘材料加工而成，使脚线间具有一定的绝缘强度。

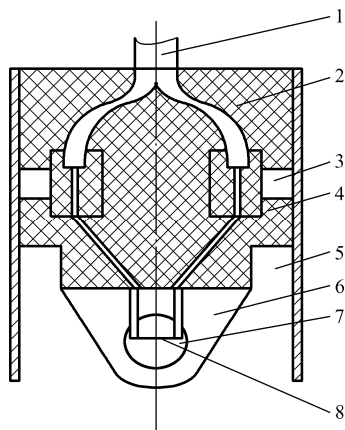
2. 使用对静电钝感的药剂

改善起爆药抗静电性能也是减少静电危害的一个途径。例如，糊精氮化铅的静电感度较其他类型的氮化铅要钝感得多，其绝缘电阻也比其他类型的氮化铅高，因此，采用糊精氮化铅对提高脚—壳间的防静电能力极为有利。另外，在斯蒂芬酸铅或其他点火药中加入适量的硼以及在氮化铅等起爆药中掺入多元醇多硝酸脂，均可提高药剂的防静电能力。而以氢化钛和高氯酸钾组成的点火药可耐 600pF/25kV 的静电冲击，而且热安定性高达 520℃，是一种性能良好的抗静电耐热点火药。这是增加脚—脚之间抗静电能力的重要方法。

3. “泄放”静电系列设计技术

1) 设置静电泄放通道

如果在结构中能设计出一条保护通道，使脚壳间的静电能量早于危险通道优先泄放，那么将能起到保护作用，如图 5-4 所示。一般认为，危险通道与保护通道击穿电压之比应大于 4，而且保护通道的击穿电压不应大于 3kV，这样才能保证在静电火花作用下，静电能量通过保护通道可靠泄放。危险通道与保护通道的击穿电压之比愈高，则在危险通道击穿之前，保护通道愈早完成击穿。由于空气具有良好的击穿重复性，所以保护性火花隙通常采用空气火花隙。



1—脚线；2—绝缘树脂；3—空气隙；4—导电性树脂；5—空腔；
6—点火药的增强膜；7—点火药；8—桥丝。

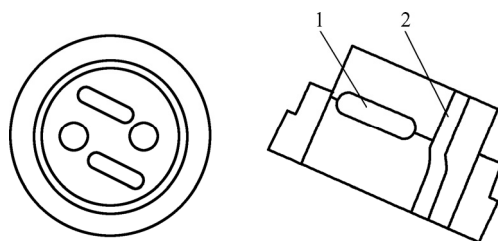
图 5-4 火花隙防静电结构

保护性火花隙最简单的一种结构是在脚线与金属外壳间留很小的间隙，使静电火花发生在外表面，而不在装药处，如美国“麻雀”III导弹涡轮发动机燃气发生器，在插塞的外表面电极脚线与外壳间约有 0.2mm 的保护间隙。这种结构虽利用了周围空气介质的放电作用作为保护电路，但易受湿度、灰尘等污染而使作用不可靠。改进的方法是将保护性火花隙置于插塞内部。如“阿波罗”飞船用起爆器在插塞内的脚线与壳内壁间开数个小孔，构成空气击穿通道，把空气火花隙密封在插塞内部，可抗 25kV 的静电。另外，还可以将插塞中导线的裸露部分先压成有突出尖端或弯曲的形状，在脚线的尖端或弯曲部分与壳体间构成保护性泄放通道。

2) 采用静电泄放元件

通过在电火工品每个脚线与壳之间并联一元件，使之在静电泄放过程中能有效地分压及分流能量，从而极大地减少脚—壳间危险通道得到的能量，以至于不被静电击穿。这类元件统称为静电泄放元件，如微型电阻和非线性电阻（微型二极管、碳化硅压敏电阻、氧化锌压敏电阻等）。

若在脚与壳之间并联适当阻值的微型电阻，当高压静电脉冲通过产品的脚—壳间放电时，则可通过泄放电阻放电。泄放电阻阻值一般选为 100Ω ，若过大，达不到抗静电目的；若过小，又影响产品的发火感度。法国“马特拉”R440 空空导弹用电雷管就在脚—壳之间并联一对 100Ω 的微型电阻，如图 5-5 所示。



1—碳膜电阻；2—脚线。

图 5-5 与脚线相连的碳膜电阻

但这种方法也有其局限性。当产品脚—脚间短路时，用并联微型电阻的方法可以满足脚—壳间的防静电要求，而当产品脚—脚间开路时，只有并联较小阻值的微型电阻才能使脚—壳间满足防静电要求，这将极大地影响产品的正常发火。

非线性电阻具有低压绝缘、高压击穿的特性，是理想的静电泄放元件。微型二极管的伏安特性为非对称型，虽然其非线性特性明显，但工作电压范围窄、耐压低、价格高且难以装配。碳化硅和氧化锌压敏电阻伏安特性均属于对称型，工作电压范围宽，但碳化压敏电阻的非线性特性相对较差，所以，氧化锌压敏电阻更适合作静电泄放元件之用。

当脚—壳间具有静电高压时，氧化锌压敏电阻会在 50ns 内由高阻态变为低阻

态，静电能量几乎全部由压敏电阻泄放掉，从而使产品脚—壳间的电压远低于其击穿电压，起到分流和过压保护作用；当产品脚—脚间处于开路态时，在任一脚—壳间加压，虽然电流也流过桥丝，但只要压敏电阻的参数选择适当，保证压敏电阻的瞬态电阻小于脚—脚间的电阻值，就能起到足够的分压分流作用，同样能满足脚—壳间防静电的要求。另外，由于桥丝火工品多为低压发火，当选择的压敏电阻的工作电压大于或等于发火电压时，即使发火电压施加到压敏电阻的两端，因未达到压敏电阻的工作电压，它仍处于高阻态（兆欧级），分能很小，不会影响火工品的正常感度和作用时间。

3) 采用抗静电电极塞

当脚—壳间的电极塞具有高压低阻、低压高阻的特性时，电极塞本身就具有了既能泄放静电又能正常发火的功能。

抗静电电极塞有非线性材料和半导体材料两类。非线性材料抗静电电极塞由高电阻的可塑性黏合剂（橡胶、环氧树脂等）、二次电子发射体材料（碘化钾、氧化铝等）和非线性电阻材料（碳化硅、氧化锌等）配制而成。美国阿特拉斯化学公司采用碳化硅非线性电阻制成塞子压制成电雷管，当加上 10~800V 的正常发火电压时，插塞呈高阻态，电流通过桥丝正常作用，而在静电高压作用下呈低阻态，可很好地泄放静电。半导体材料电极塞是由细金属粉（铝粉、黄铜等）或炭黑等导电微粒混入某种绝缘介质中压制而成，在静电脉冲作用下，插塞内部被击穿，泄放掉静电能量，在低压下呈高阻态，不影响正常发火。两类电极塞中，非线性材料抗静电电极塞的使用更广泛些。

5.2.4 抗射频技术

随着军事科学技术及新概念武器的迅猛发展，各种无线电设备应用日益广泛且功率越来越大，特别是正在研制的高功率微波武器、电磁炸弹、电磁导弹和核电磁武器使战场电磁环境不断恶化。当弹、箭等武器系统中的电火工品处于电磁环境中时，这些电火工品通过引线以及引线的天线作用、耦合作用等接收、拾取电磁能量，会在其发火电路上产生感应电流。当感应电流足够大时将引起意外引爆、瞎火或性能降低，从而造成危害。国外对这一领域进行了许多研究，L.Cartwright、Carl E.Baum 等人对热桥丝雷管的电磁特性进行了建模与仿真，以便能够精确描述此类雷管受现代电磁信号干扰时会如何响应，并一次找出提高其电池防护能力的途径。

电磁辐射对电火工品造成危害必须具备 3 个要素：①在电火工品所处环境中已出现危险的电磁辐射源；②电磁辐射源能将电磁能量耦合到敏感的电火工品上；③其耦合能量已超过电火工品的最小发火能量。防止电火工品遭受电磁辐射危害的主要途径就是降低火工品本身的射频感度，提高内部对射频能量的衰减耗散；或在传输射频路径——发火线上附加衰减器来衰减进入火工品的射频

能量。

总体来说,电火工品电磁防护方法主要有:射频钝感化、屏蔽和滤波器、齐纳二极管保护装置、双极性二极管保护装置、半机械保护结构等。

1. 电火工品射频钝感化技术

从电火工品起爆机理上分析,脚一脚间通过桥丝的着火最终是电流作用,所以,一般对直流钝感的电火工品,其射频感度也低,而通过改变电桥材料、形状和药剂以提高最小不发火能量为目的的技术,也有益于电火工品的防射频。在能量许可的情况下,采用钝感电火工品是防射频最简单、最有效的方法。直接使电火工品具有射频钝感化的技术则是以阻高频、通低频为目的的技术,如复合导线、宽频带衰减电极塞等。

1) 复合导线对电磁辐射防护率

在直流或低频电路中,均匀导线横截面上的电流密度是相同的。但在高频电路中,随着频率的增加,导线上电流分布越来越向表面集中,这种现象称为集肤效应。集肤效应减小了导线的有效截面积而增加了导线的等效电阻,所以在高频下导线的阻值会显著地随频率的提高而增加。同一根导线在高频下的阻值 R_F (简称射频电阻) 要远高于直流电阻 R_L 。将导线射频电阻 R_F 与直流电阻 R_L 之比定义为集肤效应系数 ξ 。集肤效应系数 ξ 与导线的材料、半径和通过的高频电流频率有关。例如:半径为 0.32mm 的不锈钢复合铜导线(铜与不锈钢的横截面积比 72:28),当频率为 1MHz 时,集肤效应系数 ξ 约为 72。可见,采用复合导线使导线射频电阻增大,从而提高了对射频的防护作用。

2) 宽频带衰减电极塞

电火工品电极塞材料常用陶瓷、玻璃等,但如果改为能衰减射频的材料作电极塞,就成了宽频带衰减器。宽频带衰减器是由能耗散射频能量、以热能的形式释放出来的损耗材料压制而成。由于它不改变电火工品发火性能,不增加附加装置,因此价格低廉。

目前广泛使用羰基铁粉和铁氧体两类衰减材料。这种衰减器可以等效成 $R-L-C$ 陷阱电路, R 、 L 、 C 分别表示增加羰基铁粉电极塞后分布在电火工品导线上的等效电阻、电感和电容。 R 取决于导线本身的电阻、塞子中的涡流及磁滞等损失,其值较小,可以忽略。这种衰减器的固有频率 f_c 为

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5-1)$$

在 f_c 附近较宽的高频范围内,这种衰减器的衰减效果较好,而在低频时衰减效果不好,特别是当射频远小于其固有频率 f_c 时,这种衰减器基本不起衰减作用。美国匹克汀尼工厂用羰基铁粉电极塞雷管 M78 代替了敏感的 T 24E1 铁氧体电极塞雷管,达到在频率 500MHz 下衰减 20dB,但当频率低于 500MHz 时,衰减能力迅速下降。它作用于衰减雷达频率时较为理想,但击穿电压较低,使用时常需

外加绝缘套管以与金属壳绝缘。铁氧体材料是一种烧结的金属氧化物，它在低频下有很好的衰减性能，用铁氧体电极塞制成的 T24E1 雷管的衰减性能比羰基铁粉电极塞大 4 倍。美国已经用铁氧体电极塞雷管 M78E1 代替了羰基铁粉电极塞雷管 M78，但它在高频时衰减性能很快下降，如图 5-6 所示。

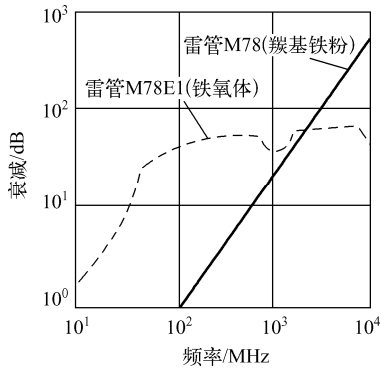


图 5-6 羰基铁粉和铁氧体材料的衰减性能

2. 低通滤波器衰减射频能量技术

火工品的射频能量主要是通过发火线进入的，因此，在射频能量的传输路径——发火线上，采用附加衰减器就可以达到衰减射频能量的目的。衰减器与电火工品配合使用时，其特点是电火工品本身感度不变，而主要是利用外加线路来降低电火工品对射频的感度，使其具有防射频能力。采用这种方法后，通到电火工品上的射频电流最大不超过几微安，大大低于发火电流，能确保整个系统的防射频效果。在导弹直列式点火系统中，当导弹内部带有发射机时，这种方法尤为重要。

射频衰减器实际上是一个低通滤波器，它通常由电容、电感等电子元件组成。 π 型对称电路及等效 Γ 型电路如图 5-7 所示。

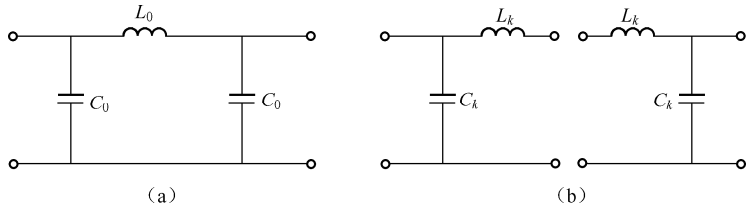


图 5-7 π 型对称电路及等效 Γ 型电路

5.3 火工品供电安全

在导弹用火工品中，电火工品占有重要比例，因此，火工品供电电路的安全成为影响火工品安全性的重要因素。火工品在导弹上得到广泛应用，并处于相当

重要的地位。如火箭发动机的点火；液体发动机推进剂的增压，发动机的起动、转级；导弹级间分离；战斗部的引爆等，都需采用火工品。火工品能否安全、可靠地工作，对导弹飞行成败有直接的影响，否则将会造成弹毁人亡的严重事故。火工品的使用特点决定了在点火电路的设计时除了满足一般要求以外，还应满足特殊的要求。

5.3.1 火工品点火电路

5.3.1.1 火工品点火电路的基本要求

1. 可靠性

点火电路的可靠性是指由于人为原因或元器件、线路等原因而导致电爆管器件失灵的概率。根据设计的要求，火工品在点火时，点火电路必须保证准确无误地供电，使火工品适时起爆。

2. 安全性

点火电路的安全性是指在预定的点火时间和点火地点之外的任何情况下，火工品不因人为的、元器件和线路的及随机因素等影响而起爆，导致危险事故产生，危及操作人员、场地和导弹的安全。换言之，火工品电路不该起爆时绝不允许火工品起爆。

3. 电磁兼容性

在影响火工品点火电路的可靠性和安全性的诸多因素中，以电磁环境干扰为甚。所以，在点火电路设计中必须采取防雷电、防静电、防电磁感应及防电磁辐射四项措施。

5.3.1.2 火工品点火电路设计措施

1. 点火电路的设计措施

因火工品在弹上的工作特殊性和火工品本身的特点，点火电路设计思想是必须确保安全性、可靠性及电磁兼容性。设计中通常采取的主要措施有以下几种。

(1) 在电爆管点火电路中，必须有多级保险，既有机械保险，又有电保险。这几级保险是串联的，彼此是独立的，但又是相互制约的。

机械保险可利用导弹飞行状态和有关飞行参数来控制电路的转换，如导弹达到某一飞行速度时气流产生的动压，导弹轴向过载值的变化，还可利用分离机构的分离来实现。电保险可利用行程开关触点转换来控制电路转换。

(2) 电爆管在不工作时，输入端通常应通过继电器的触点接地，或加短路插头座并接地。

(3) 电爆管点火的正、负极导线应采用双线制，且同时受控。

(4) 电缆网的布线和走向应远离射频干扰源，应与敏感电路和电源电路隔离，以避免产生电磁耦合。点火控制线采用绞合线并且屏蔽。这样可以避免内部或外部电磁干扰信号的渗入或耦合。

(5) 系统的静电接地及射频搭接应符合 MIL-B-5087 军用标准。接地线均应接到导弹的公共地线上, 以避免系统中出现地线环路所产生的感应电流造成的干扰。屏蔽套应接地, 以防因出现静电电位差而产生瞬时电流干扰。

射频的电缆屏蔽套应两端接地或多点接地; 低频的屏蔽套应在一端接地。要求屏蔽套是连续的, 中间不得中断。

(6) 导弹各级、各舱段之间应有良好的电气搭接, 搭接线可用两根 3mm^2 截面的多股铜线。舱口盖与弹体间也应有良好的电气通路。

(7) 一般在飞航导弹上, 选用 Π 型低通滤波器, 它既能完成点火电路的通路, 又能减小和抑制电磁干扰及抗静电的作用。它对直流或某些低频可以通过, 而对射频或其他频率则起阻碍作用。在电路中, 并联一定阻值的电阻, 又能起着泄放静电的作用。

在设计滤波器时, 既要考虑到使不需要的电磁信号受到衰减, 同时还需考虑在电路插入滤波器的情况下, 正确选择电路的负载电压和电流, 以便电爆管能可靠地发火, 滤波器能正常工作。

(8) 点火电路中, 可串联保护电阻 (又称为限流电阻), 以防止电爆器件起爆后可能出现正极与壳体相碰而造成的短路危险。

保护电阻的阻值大小及功率应进行很好的试验和计算。一般敏感电爆管点火延滞时间不大于 20ms , 可靠点火电流为 $1\sim 2\text{A}$; 钝感电爆管最佳工作电流为 $8\sim 10\text{A}$, 点火延滞时间不大于 30ms , 设计电路的保护电阻时, 应保证可靠发火电流值; 保护电阻的功率要适合, 要求保护电阻在 50ms 内不能烧坏。

(9) 在弹上电源容量允许条件下, 应尽量采用钝感电爆管。

(10) 在体积、质量允许的条件下, 点火电路可用专用电源, 以免受用电设备相互间的影响。

(11) 在地面点火的点火电路应有防止误动作的措施。

(12) 点火电路应采用冗余设计、电磁兼容性设计, 保证安全可靠。

以上为火工品电路设计的主要措施, 不同类型的导弹还应视情采用合适的措施。

2. 典型火工品点火电路

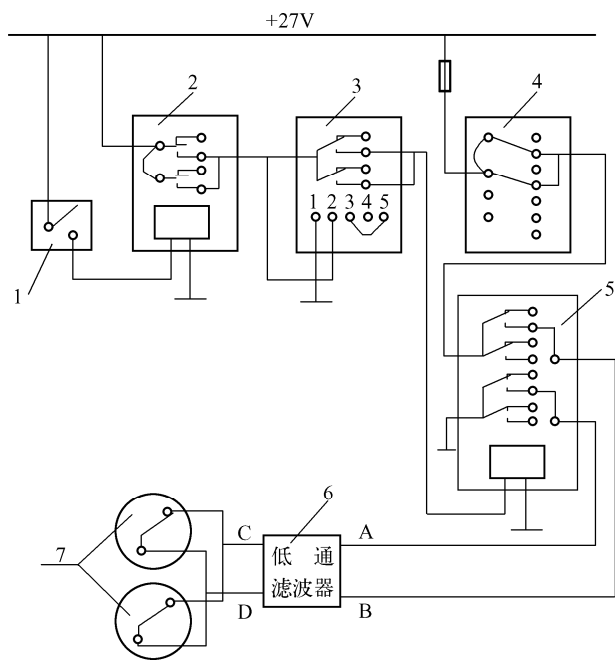
1) 电路设计中采用两级保险

在舰上, 由于电磁环境比岸防条件要复杂, 电路采用了防静电、射频、电磁干扰等综合措施。发动机点火电路原理如图 5-8 所示。

行程开关是电爆管供电电路的第一级保险。只有当助推器脱落后, 行程开关 4 的常闭点闭合, 弹上汇流条 $+27\text{V}$ 电源经它的常闭点向点火继电器 5 的中点供电, 并将点火电源准备好。

过载开关是电路中的第二级保险。当导弹在飞行中轴向过载达到预定设计的某一数值后, 过载开关 1 的触点闭合, 弹上汇流条电源通过闭合触点启动继电器

2，经它启动延时继电器 3，延时工作后，启动点火继电器 5，电源经继电器 5 的四对触点流经 π 型低通滤波器引爆电爆管组。从图中可看出，电爆管组的正负导线均由继电器 5 的触点来控制。



1—过载开关；2—继电器；3—延时继电器；4—转换开关（行程开关）；
5—继电器；6— π 型低通滤波；7—发动机点火电爆管组；8—惯性熔断器。

图 5-8 发动机点火电路原理图

2) 火工品电路采用滤波器

选用和设计何种类型的滤波器应根据导弹内部各电子设备及导弹所处的外界电磁环境来定。就飞航导弹而言，射频范围为 $10\text{kHz}\sim 40\text{GHz}$ 。根据电磁环境试验表明，发射机开机时，在 $10\sim 20\text{MHz}$ 范围内，空间电磁场强度对电爆器件的威胁最大。在飞航导弹上一般选用低通滤波器。下面以 FLB-1 π 型低通滤波器为例进行分析。

根据飞航导弹弹上无线电电子设备及舰载无线电电子设备等形成的电磁环境，即对低通滤波器提出了设计要求，主要有以下几点。

- (1) 截止频率 20kHz 左右。
- (2) 射频衰减能力对 120kHz 以上衰减大于 40dB 。
- (3) 只有泄放静电的能力，单端对地（壳体）绝缘电阻大于 $4\text{M}\Omega$ 。
- (4) 点火电压不大于 27V 。

- (5) 点火电流 2s 内允许通过 15A。
 (6) 力学环境和自然环境条件同导弹。
 其电路原理图如图 5-9 所示。

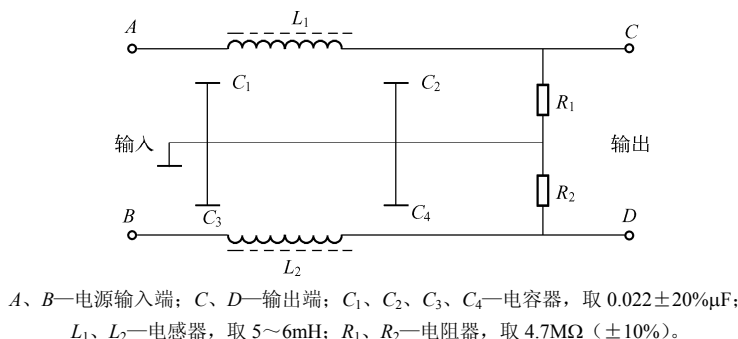


图 5-9 π 型低通滤波器电路原理图

L_1 、 L_2 作为串臂。因 $Z_L = j\omega L$ ， $X_L = \omega L = 2\pi fL$ ，故利用此特性，电感器对高频有阻流作用。

$C_1 \sim C_4$ 作为并臂，因 $Z_C = 1/j\omega C$ ， $X_C = 1/\omega C = 1/2\pi fC$ ，故利用此特性，电容器对高频有分流作用。

R_1 、 R_2 为泄放静电电阻器。

R_1 、 R_2 泄放静电电阻阻值大小应从三方面考虑：即电路的电阻值为大于特性阻抗；点火电路中必须具备一定的绝缘电阻，避免产生过大的分流作用；静电电压在电爆管上降压应足够小。满足以下条件选 $R_1 = R_2 = 4.7 \text{M}\Omega (\pm 10\%)$ ，额定功率为 0.125W。

π 型低通滤波器（FLB-1A）经实际使用性能良好，它经过力学环境和自然环境试验的考核，还经过雷击、静电、核辐射和电磁环境等项性能试验的考核，证明对雷电信号、射频信号和人体静电确有可靠的防护能力。在弹上发动机点火系统及其他电爆系统安装该产品能有效地提高抗干扰能力和工作特性。下面以几项试验结果为例进行说明。

5.3.2 引信供电电路

引信系统的任务是适时引爆战斗部，以摧毁敌方目标。如果引信系统工作不正常，其带来的后果是引信系统该工作时不起作用，战斗部不能引爆，则导弹将失去战斗力；引信系统不该工作时提前引爆战斗部，则将导弹毁灭，不能完成战斗任务。特别是在发射阵地或在舰艇、载机上，将使载体、弹毁人亡，后果不堪设想。

从引信系统的工作特点可以看出，引信系统的供电电路必须是极安全和可靠的，并且做到万无一失。

安全性和可靠性两者是对立统一的，应在设计中进行合理的平衡。

1. 设计思想

供电电路的安全性是首要问题。在电路中应采用多级保险的方案，且各级保险是串联冗余。一般为转换开关、压力开关、时间机构保险等混合作用。为了防射频等干扰，在电路上加装了滤波器。

当然从安全角度出发，保险机构越多，安全性越高，但由于保险机构的串联环节增多，势必使可靠性下降。而且保险机构越多，电路越复杂，成本也必然上升。

与安全性设计同理，必须考虑电路工作的可靠性，一般采用冗余设计，即用两条或多条支路并联，同时供电电网采用双线制。

2. 典型电路

现以某岸舰导弹引信系统供电电路设计为例，如图 5-10 所示。

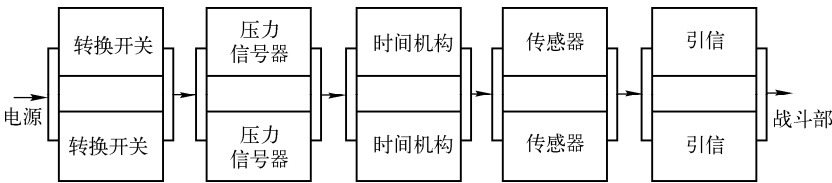


图 5-10 电引信供电电路原理框图

I 级保险：当助推器脱落后，转换开关常闭点闭合，弹上电源通过转换开关的常闭点向下一级保险供电，解除 I 级保险。

II 级保险：当导弹发射后速度达到某一预定值时，压力信号器的常开点闭合，向下一级供电电源准备好，解除 II 级保险。

III 级保险：时间机构在发射前，根据导弹飞行距离进行时间装定。供电电路中 I 级、II 级保险均解除的情况下，在保险时间内，电引信仍不能工作，必须到装定的保险时间结束才能转换电引信装置的电路向引信供电，即解除了 III 级保险，使电引信处于待发状态。

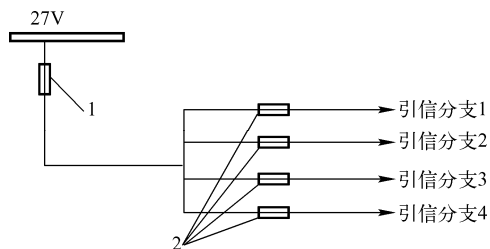
设计 I、II、III 级保险串联是为了安全性；采用两支路并联是为了提高电路供电的可靠性。

3. 供电电路的保护

在电引信系统供电电路中采用惯性熔断器和快速熔断器相结合的方式。

现以某岸舰导弹电引信系统供电保护电路为例来说明，如图 5-11 所示。

这样设计的目的是引信电路分支即使有一路产生短路现象，由快速熔断器迅速断该支路，而对总的供电电路产生瞬时冲击。由于惯性熔断器能承受瞬间的过负荷，所以不至于切断总的供电电路，从而可以保证其他引信支路的供电。



1—惯性熔断器；2—快速熔断器。

图 5-11 电引信供电保护电路

本章小结

本章论述了导弹火工品药剂安全、安全性设计及供电电路安全等内容，详细分析了从火工装药、结构设计及电路设计等方面提高火工品固有安全的原则、方法和途径。

思考题

1. 试阐述药剂对火工品安全的主要影响。
2. 试论述提高火工品安全性的主要设计方法和途径。
3. 对火工品点火电路有哪些特殊要求？
4. 引信系统供电电路的特点是什么？

第6章 火工品勤务处理安全

导弹火工品勤务处理包括储存、运输、操作等多方面内容，在各环节中会有不同因素对火工品安全造成影响。

6.1 储存安全

储存环境是指弹药在储存过程中所能遇到的环境，是储存过程中影响弹药的诸因素的总和。储存环境按性质可分为自然储存环境与人工储存环境，按场所可分为弹药舱环境、棚库环境、露天环境等。此外还可分为野战储存环境（如码头存放等）与后勤储存环境。储存中对弹药武器产生影响的环境因素主要有温度、湿度、霉菌、气压、腐蚀介质等，其中以温度和湿度的影响最大。

一般而言，我国北部海域及沿海地区的主要环境特点是：降水少，气压较高，冬季时间较长且气温、水温低，出现霜冻的现象较多；东部海域及沿海地区的主要环境特点是：降水多、空气湿度大，夏季时间长且气温高，多霉菌；南部海域及沿海地区的主要环境特点是：降水多，全年气温高、湿度大，海水盐度高、空气盐雾大。因此，从总体上看，海军导弹各储存地点的环境条件差别主要体现在温度、湿度、气压、降水、霉菌、盐雾等因素上。

6.1.1 温度影响及效应

温度是表征物体处于热平衡系统的一个参量，随季节、地理位置及人工热环境的不同而不同。高温、低温、温变均会使弹药火工品的火炸药、机械电气元器件产生一定的温度效应。

温度环境是自然环境因素之一，是产品必然经受考验的外界环境条件之一。温度是产品储存、运输和使用中时刻要遇到的环境，温度本身及温度与其他环境综合作用，时刻在影响着产品的性能。在储运过程中通常以温度和湿度两大因素为重点加以控制。温度的变化会引起湿度的变化，二者协同作用对弹药火工品的影响更为显著。

6.1.1.1 高温效应

高温能改变火工品的物理化学特性，对于机械部件，可引起尺寸、强度与刚度等特性变化；火工品中的纸布、皮革、橡胶、塑料件、防护漆层老化变质，使

密封的防锈油流失，装药变质、性能变差；对于电子元器件，会引起导电特性、触点变形、焊点开裂等变化；对于火炸药等化工材料，会引起燃速变化、装药熔化流化等变化，并导致爆炸事故发生。

火工品环境温度越高，火药的热解速度就越快，火药变质就越快，变质后的火药也会使火药燃速变化，影响弹道性能。火药的热解是放热反应，加上火药分解时产生的氧化氮的催化作用，促使热解加速进行，加上散热不良等条件，热解和自动催化恶性循环，甚至会酿成自燃事故。如温度过高对梯恩梯炸药来说，会出现流油现象，造成起爆不完全，或难以起爆；还会加速火药的热分解、水解和氧化氮的自催化作用，如黄硫磷自燃等。因此，对于保管时间长的火工品，或包装散热不良（例如牛皮纸包装外蘸沥青）的火工品，应注意防热，加强检查、化验以防止自燃事故。通常，火工品长时间处于高温环境中，可直接导致部分装药加速挥发、分解、老化、锈蚀及熔化、燃爆等。表 6-1 为部分火炸药的热性质。

表 6-1 常见火炸药热性质

序号	火炸药名称	熔点 /℃	爆发点 /(℃/5s)	爆热 /(kJ/kg)	爆温/K	安 定 性
1	梯恩梯	80.9	475	4184		150℃不分解，200℃分解 0.8%需 385min
2	氮化铅		330	1522	4300	
3	特屈儿	128	257	4561	3370	150℃半分解期 211min
4	黑索金	202	260	5774	4000	190℃半分解期 270min
5	奥克托金	276	335	5652		200℃半分解期 311min
6	太安	141	225	5858	4280	
7	雷汞		210	1543	4450	

由于大多数产品在温度环境下，其内部不会受到均匀的加热和冷却，因而温度梯度就会产生引起弹药火工品结构、装药破裂或永久性变形的内应力，改变产品所用材料的物理性能或尺寸，因而会暂时或永久性地降低产品的性能。高温可能导致的弹药火工品主要失效效应如表 6-2 所示。

表 6-2 高温对火工品的影响效应

影 响 类 型	后果或危害
材料热胀	装置活动部分产生黏合、卡死，紧固部分出现松动；接触不良；产品尺寸全部或部分改变；电子电路的稳定性改变
干裂	固体火药或药柱产生裂纹；有机材料开裂或出现裂纹
燃烧加快	爆炸物或推进剂的燃速增加
气体热胀	容器压力增大、封装弹药内压力增大
化学分解和老化	材料性能改变，甚至丧失，着火；焊缝融化、焊点开裂；炸药熔化和自燃
金属氧化	接点接触电阻增大、表面电阻增加

6.1.1.2 低温效应

低温对机械部件、电子元件及非金属等各种材料都能产生影响，主要使材料的物理性能发生变化，工作性能暂时或永久性损坏，并致使装药强度变低，温度变化幅度过大，也会使难挥发性物质挥发，装药分解速度加快，有的炸药可能会出现渗油、析晶等，同样使感度增高。

温度过低会使火工品中的橡胶发脆而强度下降，塑料发硬而断裂，纸、布、皮革等材料在低温下会发生霉变，也会使防护漆层脆化易脱落，还会使胶质火药变脆易碎，导致燃烧面积增大，燃烧速度增大，使火药的机械强度下降，药粒破碎，从而使燃烧面积增大、燃速加快。主要失效效应如表 6-3 所示。

表 6-3 低温对火工品的影响效应

影 响 类 型	后果或危害
材料变脆	结构强度下降，并易断裂；橡胶、塑料硬化
材料收缩	龟裂、失去弹性，使减振或密封失效；配合间隙发生变化，使机械动作迟缓或停止；插头座等接触不良
水、汽冻结	动作停止，功能失灵
元器件性能改变	电阻、电容数值变化；电解电容器易损坏
燃速下降	装药战技性能下降
其他	加速材料老化；加速金属的电化学腐蚀

6.1.1.3 变温效应

温度若急剧变化，火工品金属零件会急胀、快缩，使各结合部缝隙增大，引起复合材料界面开裂，不利于保持密封，还可能使金属件与装药之间发生移位、松动，影响其结合的牢固性。温度反复变化将使这种作用加剧，其影响更加明显。温度剧烈变化会加速金属材料的腐蚀或非金属材料的老化，温差大会形成冷热冲击条件，大气中的水分会在金属表面或包装容器内产生凝结水，从而为大气电化学腐蚀创造条件。有研究表明，相对湿度在 65%~70%，气温下降至 6℃时，就会出现结露现象，当温度变化造成局部环境空气饱和而结露时，可促使装备出现生霉、生雾及老化，加速发射药的水解过程，炸药受潮等。变温可能导致的火工产品失效主要效应如表 6-4 所示。

表 6-4 变温对火工品的影响效应

影 响 类 型	后果或危害
材料剧烈膨胀与收缩	运动部件黏结或减速，零件变形或破裂；火炸药药柱产生裂纹；密封部件泄漏；涂层表面、材料界面开裂
凝水或结霜	电子或机械发生故障
其他	加速材料的老化；加速金属的电化学腐蚀

6.1.2 湿度影响及效应

湿度是表征大气中水汽量即潮湿程度的一个参量，常用相对湿度即实际水汽密度与饱和水汽密度之比进行描述；湿度是影响许多其他环境因素的重要决定因素。对火工品产生影响最大的是高湿，低湿、干湿交替也会造成不良影响。高湿会引起或加速金属腐蚀、元件损坏，电气绝缘性能降低，促进吸湿性强的材料质量发生变化，且会促进霉菌的生长；低湿会产生干裂、脆化、粉化和静电；干湿交替会加速一些材料的吸湿和金属的腐蚀过程。湿度对产品、设备的主要效应如表 6-5 所示。

表 6-5 湿度对火工品的影响效应

湿度环境	影 响 类 型	后果或危害
高湿	水汽凝露	绝缘材料电阻和热性能降低、电气短路、降低电子元器件性能；密封设备材料的溶解和变化
	材料吸湿增强	材料膨胀、变形，物理性能降低，结构破坏；电性能变化；包装箱强度下降；炸药和推进剂变质
	加速金属氧化和腐蚀	活动零件卡住；结构强度减弱；表面电阻增大、电接触不良
	加速化学或电化学反应	破坏有机涂层、材料化学和物理性能下降、加速金属腐蚀
	促进生物活动	促进霉菌生长，使材料产生或加剧霉菌破坏
低湿	材料失水	材料变干而发脆或粉化；易产生静电；加速材料干裂或龟裂；火工品性能变差
干湿交替	毛细管“呼吸”作用	加速材料反潮
	金属表面干湿交替	加速电化学腐蚀

在一定的温湿度下，当物质的实际含水量低于其平衡吸湿量时，物质就吸湿并达到平衡水分含量；反之就挥发，并减小到平衡水分含量。物质的吸湿性与物性有关，衡量物质吸湿性的大小应在相同的温湿度下，视其平衡吸湿量大小，平衡吸湿量大的吸湿性大。如在常温和 80% 的相对湿度下，单基药的平衡吸湿量约为 1.8%，而双基火药约为 0.59%，所以单基火药吸湿性比双基火药大得多，当然，吸湿量小的火炸药较好，因其受湿度的影响较小，对保持性能稳定有利，这只能由装药的设计来保证。

湿度过大对弹药的影响主要是使金属部分锈蚀和弹药的包装箱、布、木和皮革材料制作的零件受潮霉烂，也使火工品中的橡胶塑性和强度下降，还会使装药变质性能变坏，硝铵炸药吸湿结块难以起爆。胶质火药水解加快，使燃烧速度下降或者不燃，烟火剂吸湿受潮而失效，各种火帽中的击发药吸湿后不可靠，严重时瞎火。湿度过小时会使胶质火药中水分蒸发，燃烧速度加快也会使火工品中皮革件变脆而断裂。绝对湿度与蒸发面积风速及气温有关，沿海地区的湿度一般大于内陆地区的湿度，沙漠地区的更小。在相同的条件下气温越高水量越大，如在同一地区夏季的湿度比冬季大。

此外，火炸药在储存过程中还会缓慢分解释放出一些具有锈蚀性气体，如氮和硫的氧化物等，这些锈蚀性气体对弹药装药有明显的催化分解作用。当有水存在时，氮的氧化物对弹药装药的催化分解作用明显增大。当水、一氧化氮和二氧化氮共存时，硝化纤维素的分解速度增大 100 倍以上。

相对湿度是影响火工品吸湿的最主要的环境因素，在火工品的生产和储存过程中，应保持适当较低湿度，一般规定不超过 70%。对黑火药、烟火剂、起爆药和引燃药来说，都较易吸湿而使其作用不可靠或失效，同时也加快火工品金属部件的锈蚀。相对湿度过小时，火药中的水分会挥发而减少，也会使燃速增快。

通常，黑火药在储存中易受潮，长期储存后吸湿使含水量由出厂时 0.7%~1.0%增至 2%~4%就难以点燃。含水量在 4%以上时，有较多硝酸钾溶于水，成分的均匀性变差，点燃更困难。黑火药中的含水量达 15%，则不能点燃或燃烧。黑火药吸湿变质后，不易被点燃或扩燃，从而导致底火瞎火。含雷汞击发药的装药受湿度影响较敏感，当吸湿后含水量大于 0.03%时，机械感度大大下降，有可能在正常条件下不能发火。长期储存中，击发药受潮变质后，底火就会产生“迟发火”或“瞎火”。据统计发现，燃烧时间超长是最常见的，约占总失效数量的 95%以上。

对于密封包装火工品，温度的传导性会使得包装内外的温度趋于一致。但温度的变化，对敞开或密闭体系的相对湿度的影响却有很大差别。在敞开体系中，温度的高低与湿度成正比；而在密闭体系中，温度的高低，对其内部的绝对湿度和相对湿度的影响是复杂的。

当温度升高时，盒内空气的含水量会因内部吸湿物水分的挥发而上升，因此温度的升高虽使盒内相对湿度下降，但降低的程度与盒内无吸湿相比要小些。当温度降低时，盒内的相对湿度升高，但由于盒内木质和纸质部件吸收一部分水分，所以其相对湿度的升高较盒内无吸湿要小，其露点温度也会相应降低，它不符合敞开体系的相对湿度变化规律。此外，温度的变化，也会引起密封盒内的压力变化，温度每升高或降低 10℃，介质内压力将随之升高或降低约 0.03 倍。温度升高，则水分蒸发增加，反之则减少。而压力对相对湿度的影响正好与温度相反，因此密封盒内的压力变化对因温度变化而引起相对湿度变化有一定的抑制作用。

当温度降低时，盒内的相对湿度增加，当达到露点温度时，其结露的部位是有选择的。它首先结露于最低温区，对密封盒来说，其最低温区是密封盒的内表面，所以，当盒内温度达到露点温度时，首先在密封盒的内表面结露，由于水分子的吸附和表面张力的作用，会形成以此露珠为核心，并逐步向四周扩散开去的情形，对整个密封盒内表面，冷凝选择在凝聚核最多的地方，实验室试验证明，用极其清洁的空气进行冷凝试验，在开始冷凝之前会达到 70%以上的饱和状态。

若温度变化很小且是渐变过程的，则对密封体系来说，其影响并不明显；但当温度变化很大，或达到其盒内的露点温度时，则对其内部弹药的影响很大，会

影响弹药作用功效，加速金属锈蚀速度，使其内部非金属材料（如木制品、纸制品、棉制品等）霉变腐烂。特别是当密封体系骤冷骤热或温度频繁交替升降时，其内部会凝结大量的水，使得弹药失去功效。检查发现存放于密闭体系中的传爆药柱破碎、药柱的布袋霉烂、火工品长白毛和锈斑、密封盒鼓胀等现象。可以说明：外界温度的变化引起其内部相对湿度的变化而使其功效降低。据历年销毁弹药结果表明：火工品密封盒的内表面几乎无锈蚀现象，说明其盒内的木板和纸张具有一定的湿度调节功能。

对密封包装来说，由于内部火工品的各部件（如传爆管、炸药等）相对隔绝密封，所以各部件相对来说也是一个小的密封体系。随着温度的变化，各种药剂也会吸收或释放水分，这种小密封体系也像密封盒一样，其空间相对湿度也随温度变化而变化，也可能出现结露现象。其露点温度与其包装时的空气相对湿度关系很大。当相对湿度在 65%~70%，气温下降至 6℃时，会出现结露。密封包装内空气相对湿度与气温的关系见表 6-6。

表 6-6 密封包装内空气相对湿度与气温的关系

序号	封装时空气的温湿度			密封包装内相对湿度所对应的气温/℃			
	气温/℃	相对湿度/%	绝对湿度/%	65%	75%	100%	结露
1	20.5	53	12.1	16.3	15.8	9.8	<9.8
2	15.0	65	11.1	15.0	13.7	8.5	<8.5

6.1.3 其他因素影响及效应

6.1.3.1 气压影响

气压是大气气体分子运动碰撞物体表面而产生的压力。一般而言，气压对设备产生的影响不是由气压量值大小造成，而是取决于压力差。气压可能导致的火工品主要失效效应如表 6-7 所示。

表 6-7 气压对弹药火工品的影响效应

压力环境	影 响 类 型	后果或危害
高压	压缩	引信、火工品结构破坏；密封破坏；功能影响
低压	膨胀	火工品包装器材破裂甚至爆炸
	密封失效	引信、火工品电气性能变化、机械强度下降
	空气绝缘度下降	绝缘击穿，跳弧，出现电弧，产生电晕；漏气；出现臭氧

6.1.3.2 生物环境与盐雾影响

1. 生物环境

生物条件主要是一些霉菌类微生物侵入库存导弹内部，黏附在火工品的表

面，造成材料表面绝缘电阻降低、金属器件锈蚀、线路短路等，这些会造成火工品无法工作或者刚工作就因短路烧毁。霉菌对产品有很强的锈蚀作用，霉菌的生成改变了设备的物理性能。霉菌依靠水、氧和氢作为养料，不仅棉、毛、皮革可以作为霉菌的养料，而且如封装材料、包封树脂等合成材料也可以作为霉菌的养料。霉菌生长在污染物沉积的器件表面上，是在制造、使用期间被污染的，即使耐霉材料，也能引起底层材料的破坏。霉菌的代谢产物有机酸能引起金属锈蚀，表面材料剥蚀，生长在易霉材料表面与临近抗霉材料相接触的霉菌，跨过绝缘材料表面繁殖生长时，可以破坏和降低绝缘强度，影响电路的电气性能，微生物生长形成扩展性堆积物，可以使保护层破坏、松动、裂缝和起泡，还可以通过消耗固态和气态物质，破坏金属表面的电化学平衡，在高阻抗电路中产生漏电通路等。霉菌在相对湿度大于 70%，温度 25~35℃时才能大量繁殖。因此严格控制储运管理环境的温度和湿度对抑制霉菌引起的失效非常有效。

2. 盐雾环境

盐雾大气环境能加速应力锈蚀、加速不同金属间的电偶锈蚀和加速电化学造成的锈蚀，特别是沿海地区和海洋环境，其严酷程度较高，能在元器件表面覆盖导电层，产生导电层，使机械部件及组合和活动部分阻塞或卡死，从而使其容易老化而失效。

锈蚀对火工品储存质量的影响主要表现为盐雾、盐水和锈蚀性气体的锈蚀作用。盐雾、盐水本身是很好的电解质，当火工品金属元件受到盐雾侵蚀时，很容易发生电化学反应而加速锈蚀。在高湿条件下，空气中的盐分溶解在弹药金属元件表面水膜中，具有加速锈蚀效应。盐雾、盐水还会促进非金属材料老化和防护涂镀层的加速破坏。

海风使沿海地区大气中含盐量增加，大气中含有大量氯化物（NaCl，MgCl₂等）、硫酸盐（CaSO₄，K₂SO₄等）、镁离子等见表 6-8。潮湿海洋性大气成分主要是水和盐，盐能加速化学和电化学反应及锈蚀作用，对弹药储存寿命影响较大。

表 6-8 沿海地区潮湿大气成分

成分	水分	氯化钠	氯化镁	硫酸镁	硫酸钙	硫酸钾	碳酸钙	溴化镁
比例	90	7.78	1.09	0.47	0.36	0.25	0.03	0.02

6.2 转运安全

导弹火工品在从出厂到部队、从储存地点到技术阵地、从技术阵地到使用平台等转移过程中，不可避免地要受到运输环境的影响。

运输环境是指在运输过程中对产品产生直接或间接影响的诸因素的总和。运输工具、装卸固定情况、道路条件等的不同，对运输状态下的导弹所产生的影响

也不同。运输环境对导弹的影响，主要取决于运输过程中的诱发因素，有振动、冲击等。运输环境可分为后勤运输与野战运输。后勤运输有陆运（火车、卡车或拖车）、空运和海运三种方式，一般而言，陆运环境较海运、空运更为严峻，而陆运中又以公路运输环境最为恶劣；野战运输环境的典型条件是运载工具为卡车、半拖车或履带车，道路条件恶劣。

6.2.1 振动影响及效应

振动是指火工品储运周期乃至整个寿命期内不可避免的各种机械环境因素。由于火工品的固有特性和特殊的使用要求，火工品在结构设计及产品包装环节已经做了防护处理，多数能经受住正常情况下的振动，即绝大多数环境力对于火工品安全而言属于干扰，它们不会破坏其正常工作状态，然而，在少数偶发大环境力的作用下，当振动和冲击引起零件受力方向同解除保险受力方向一致时，则对火工品危害很大，诱发火工品安全状态改变，如连续的振动冲击耦合引起的引信、底火安全状态意外改变，进而可能引发事故，产生严重后果。

火工品在运输、装卸过程中，炸药装药会受到不同频率和强度的冲击和振动，如果装药与火工品壳体间存在间隙或装药存在疏松、破碎、裂纹、杂质等缺陷，则装药之间、装药与火工品壳体间可能产生摩擦作用，由此可能引爆炸药造成安全失效。即使勤务处理期间不出现问题，勤务处理过程也有可能使装药缺陷进一步放大，增大发射危险性。戴开达等研究认为，炸药装药的初始损伤使起爆压力阈值降低，实际上相当于机械感度增大，导致安全性降低。

振动可以造成弹药火工品的装药松动或损坏，内外包装之间的反复摩擦而破裂，造成弹药火工品包装损伤，使密封包装失效，然而，振动所产生的最直接、最显著的影响作用是使机械部件产生应力和疲劳。在共振条件下，由于激励产生的加速度超过弹药的实际安全负荷，致使保险解脱而出现危险；长时间振动导致弹簧的疲劳老化，弹性降低，使引信易于解脱保险而发生危险，并对机电产品（如机电引信）产生多方面的影响，具体如表 6-9 所示。

表 6-9 振动对弹药火工品的影响效应

影响类型	后果或危害
机械影响	材料机械强度降低，磨损加剧，紧固件、连接件松动，结构变形、破坏，引信易于解除保险而发生危险，火工品装药松动
电气影响	晶体管外引线、固体电路管脚、导线折断；联结器、继电器、开关失效；电子插件性能下降；引信装置电气性能下降；黏结层、键合点脱开，电路短路、断路

6.2.2 冲击影响及效应

在非作战环境条件下，火工品在转运、值班过程中可能经历的冲击环境主要有：①转载、搬运时因人为失误或机械故障造成坠落或撞击而产生的冲击；②转运

中，载体遇突然情况发生跌落或碰撞而产生的冲击；③挂接载体之间相互碰撞而产生的冲击；④空中载体在起飞、着陆特别是弹射起飞、拦阻降落而产生的冲击。

跌落是装卸过程中的常有现象，也是冲击损坏的主要方式，表现为火工品或包装箱与地面（或甲板）发生撞击，撞击产生的较大加速度对弹药安全具有严重影响。火工品在搬运环境中所受的机械负荷主要有冲击载荷，如翻滚、碰撞、跌落、高抛等，特点是物体在很短的时间内发生很大的速度变化，能量形式变换显著。冲击速度的大小取决于物体移动速度或跌落高度，而冲击力或冲击加速度的大小，除了与跌落高度有关外，还与弹药质量及地面（或甲板）硬度等因素有关。人在搬运过程的最大举高约 3m，货物质量一般小于 50kg；机械铲车最大举高 4m，吊装时最大举高约 6m，在存放时堆码高度最高 3.5m；跌落高度决定了落地速度。根据能量转换关系，物体跌落到地面时的速度可以由公式求出加速度大小与跌落高度有关，高度越高跌落速度越大，产生的撞击加速度越大，跌落加速度大小关系到弹药安全。

在土质坚实地面且具有包装箱的条件下，模拟以上装卸环境进行弹药装卸环境力试验，测出人工装卸的跌落冲击加速度 10g 左右，用力抛掷最大可达到 100g；铲车作业时冲击力在垂直方向最大 1.7g；吊车起重作业产生的冲击加速度 18.7g。如某型机电引信在无包装情况下，从 6m 处落向地面冲击加速度峰值约为 140g，持续时间约 10ms，而落到钢板上时冲击峰值高达 1000g，持续 320μs。

机械冲击在储运中对火工品的影响比机械振动还要大。冲击可以发生在转运、装卸和储存（跌落、撞击）中。装卸过程中的冲击相当严酷。这种瞬态的力或运动，其时间变化非常迅速。如此剧烈的冲击，对弹药火工品的危害是显而易见的。冲击所产生的主要影响作用是使机械部件产生应力，也会引起机电产品（如机电引信）电气性能变化，如表 6-10 所示。

表 6-10 冲击对弹药火工品的影响效应

影响类型	后果或危害
机械影响	使产品结构产生快速增长应力而失效，产生永久变形、折断和断裂；产品结构间的相对运动增大或减小构件间的摩擦或干扰而造成设备失效；加速材料的低周期疲劳
电气影响	改变绝缘强度，降低绝缘电阻，使磁场和静电场强度发生变化；导线断裂，电路短路或断路

6.3 操作安全

在导弹火工品处于操作检测环境中时，既会受到温度、湿度、气压等因素的影响，又会受到振动、冲击、撞击等因素的影响，还会有电磁、冲击波等战场环境因素的影响。相对而言，电磁环境是最直接也是最危险的安全影响因素。

6.3.1 静电影响及效应

6.3.1.1 静电环境

火工品因静电放电而自燃自爆的事故时有发生。在导弹火工品操作检测环境条件下,产生静电放电的偶然因素更多,火工品储存、转运、使用条件下,静电源主要有以下 3 个方面:

(1) 接触、分离起电。在弹药的转运、搬动中,其包装材料与其他物体分离、摩擦时就会产生静电。人在脱衣或从皮椅上起立时会产生几千伏甚至上万伏的电压。

(2) 剥离起电。打开弹药火工品密封包装取弹时,人体及包装材料都会产生较高的电压。此外,揭开弹药表面塑料棚布时也会产生很高的电压。

(3) 感应起电。火工品堆积附近有雷电发生时,雷电极高的电位能在弹药表面感应出很高的电压。虽然弹药堆发生直击雷的概率很小,但感应雷却很多,尤其在南方雷雨季节,弹药表面感应出电荷的电压足以击穿弹药内部电路、引燃火工品。当这些高压的危险静电源和弹药的电路及火工品间发生能量耦合时,就会产生静电放电现象。放电电压可高达数万伏,放电电流达上百安,频谱范围可达千兆赫,其电流波形的上升时间可小于 1ns。静电放电可以造成电火工品意外点火爆炸,也可以造成电子设备的严重干扰和硬损伤。

6.3.1.2 静电对电火工品作用形式

静电对电火工品的作用形式主要有两种。第一,脚线—脚线。静电荷从一个脚线输入,经过桥丝从另一脚线输出,这种形式的起爆与正常起爆相同,如图 6-1 (a) 所示。第二,脚线—壳。静电放电通过脚线与外壳间的药剂从管壳输出,如图 6-1 (b) 所示。

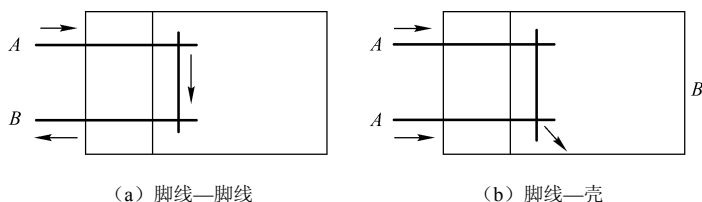


图 6-1 静电对电火工品的作用形式

美国从 20 世纪 60 年代中期开始规定以 500pF、充电 25kV、串联 5000Ω 电阻作为标准人体放电参数。GJB 736.11—1990《火工品试验方法 电火工品静电敏感度试验》中,也将 (500±25) pF、充电 (25.0±0.5) kV、串联 (5000±250) Ω 设定为模拟人体带电的静电敏感度试验条件。由此可以得出人体静电能量 E_j 为

$$E_j = 0.5 \times CV^2 = 0.5 \times 500 \times 10^{-12} \times 25000^2 = 0.156J$$

如果一个人带有这样的静电能量与电火工品脚线相接触,设桥丝电阻为 8Ω,

则通入电桥的能量 E_1 为

$$E_1 = 0.156 \times 8 / 5000 = 0.2 \text{ mJ}$$

此能量可能使火花式电雷管发火，但尚不足以引起目前最敏感的桥丝式电雷管（碳桥除外）发火，又由于电火工品在独立储存或装于电火电路中时，一般会有短路保护（通过短路插头、微动开关或继电器件），所以，通常静电引发桥丝式电火工品的位置不在脚线与脚线之间。但是，当静电高压作用于电火工品脚线与壳体之间时，将会产生击穿，形成电火花，由电火花引爆装药。电火工品脚线与壳体之间的静电高压击穿需要的起爆能量很小，所以它是最经常和最危险的意外发火形式。因此，桥丝式电火工品的静电安全试验的测试也主要在脚—壳之间进行。

6.3.1.3 静电防护

1. 人体防静电

人体是火工品操作检测的主体，也是最常见的危险静电源。要做好人体静电防护，必须从地面、服装、鞋袜及腕带等方面入手，而这些条件是环环相扣的，一旦其中一个环节出现问题，就前功尽弃，甚至酿成事故。

1) 防静电地面

土地、砖地和水泥地的静电泄漏电阻值一般都在 $10^8 \Omega$ 以下，都可作为防静电地面使用。在有火炸药、电火工品等爆炸危险品的场所铺设防静电地面时，应考虑防尘、防碰撞火花等。水泥类防静电地面的特点是耐冲击、耐压、耐水泡，缺点是坚硬、易起灰；导电沥青类防静电地面通过掺入导电炭黑增加电导率，优点是适宜经常冲洗、有弹性、电导率稳定、冲击性优于水泥类地面，特别适用于怕冲击、摩擦的弹药工房；缺点是颜色单调、不美观；导电橡胶类防静电地面优点是施工简单、弹性好、受环境湿度影响小，适合于旧工作间的防静电改造或临时性铺设，缺点是胶板之间有接缝，易积存粉体颗粒、不便清洗。无论哪种材料的防静电地面，都应可靠接地。

在有易燃易爆物质存在的危险场所，要求地面的静电泄漏电阻值在 $10^5 \sim 10^8 \Omega$ 。

2) 防静电鞋和导电鞋

防静电鞋的作用是使人体处于静电接地状态，防静电鞋必须和导电良好的防静电地面配合，才能保证人体静电能够通过鞋和导电性地面顺畅地泄漏到大地。防静电鞋的外观与普通鞋一样，见图 6-2；不同的是鞋底掺入了炭黑或防静电剂，电阻较小、受空气湿度影响小。

按照国标 GB4385—95《防静电胶底鞋、导电胶底鞋安全技术条件》的规定，防静电鞋的鞋底电阻值为 $1.0 \times 10^8 \Omega \sim 5.0 \times 10^8 \Omega$ ；导电鞋的鞋底电阻值规定不大于 $1.5 \times 10^5 \Omega$ 。对于防静电鞋来说，使用的场所可能既有危险静电源，又有工频交流电，为了使人体能及时消除静电积聚，又防止人体一旦触及工频电源时发

生强电击事故，对防静电鞋的电阻值不仅有上限要求，而且有下限要求。导电鞋只能用于没有工频电源等强电电击危险的场所，因此，鞋的电阻值仅有上限规定。穿防静电鞋时，要注意不能使用化纤、羊毛等绝缘性织物鞋垫，也不要穿厚羊毛袜等，特别是寒冷地区，空气干燥、易起静电，而防静电鞋是人体静电向大地泄漏的主要通道，一旦泄漏电阻增大将严重影响防静电效果。



图 6-2 防静电鞋

3) 防静电腕带、脚束、手套等

防静电腕带、脚束都属于临时性静电接地用具。在坐着装配、操作对静电特别敏感的产品时，如 MOS 器件、薄膜电雷管、屏蔽导电药电雷管等，安全电压都规定小于 100V，要求操作者必须戴静电泄漏电阻为 $10^6\Omega$ 的防静电腕带或脚镯，并可靠接地，实现人体静电接地，如图 6-3 所示。注意，防静电腕带并非一条短路导线，它有电阻，目的是既能保证静电荷释放到大地，又不致引起剧烈的火花放电。操作静电敏感物体之前，应先戴好腕带、脚束，释放掉人体电荷。



图 6-3 防静电腕带

4) 防静电服

防静电工作服必须和防静电（导电）鞋、防静电（导电）地面配套使用，才能有效地消除人体静电和衣服的静电，因为防静电工作服消除人体静电的基本原

理是通过人体静电接地途径传导电荷以消除静电。因此，防静电工作服应是“三紧式”，如图 6-4 所示，即领口、袖口和下摆均采用收紧式结构，而且不使用衬里，以保证工作服与人体紧密接触，使衣服上的电荷可以通过人体向大地泄漏。防静电工作服应在进入静电危险场所之前穿好，现场禁止穿脱衣服；防静电工作服上禁止佩戴任何金属物件。



图 6-4 防静电服

防静电工作服的布料通常有以下几种类型：第一种是不锈钢纤维防静电布，在天然或合成纤维纺织加工过程中，加入少量不锈钢纤维，织成防静电布。这种布料制成的防静电工作服的特点是消电效果好，残留电压低，耐洗涤，消电效果受温湿度条件影响小。第二种是铜络合纤维防静电布，即在纤维喷丝后经过铜离子络合，使纤维表面镀上一层铜离子络合物，起导电作用。这种防静电布不耐酸碱腐蚀，耐洗涤性较差。第三种是碳素纤维防静电布，即导电微粒（一般为导电炭黑）加入纤维原料内，然后喷丝或者涂敷在纤维表面上，使纤维具有电晕放电效应。这种防静电布的缺点是残留电压高。第四种是使用抗静电剂制成的防静电布，即在纤维表面涂敷或在纤维原料中加入抗静电剂，制成易于吸收空气中水分的防静电布，缺点是空气干燥时，几乎没有抗静电作用，且不耐洗涤。

2. 勤务环境防静电

1) 火工品储存环境

火工品储存环境的主要作业包括火工品箱的装卸、搬运、码垛和拆垛，作业过程中的车辆、机具、人员及火工品箱都可能成为静电源。由于储运过程中火工品不是裸露的，与静电源无法形成直接能量耦合，洞库中有时存在火工品包装材料或其他物体散发出的易燃性气体，但浓度极小，达不到爆炸浓度极限。应该采取的防静电措施是：

(1) 地面应是水泥地面或涂刷防静电涂料的地面，泄漏电阻小于 $10^8\Omega$ ，严禁使用普通橡胶板、塑料板、复合木地板、沥青等材料铺设地面，也不允许使用绝缘漆涂刷地面。

(2) 作业人员应穿防静电鞋或导电鞋，也可穿鞋底电阻不大于 $10^7\Omega$ 的普通

军用皮鞋，禁止穿塑料底鞋或用绝缘鞋垫。不准穿化纤、毛面料服装。

(3) 运弹药的机具应保持静电接地，静电泄漏电阻不大于 $10^8\Omega$ 。

(4) 库内相对湿度不得低于 40%。

(5) 库内作业时严禁跑跳、打闹、脱换衣服，避免猛烈的分离操作。

2) 火工品技术检查环境

火工品技术检查一般在干燥季节进行，容易产生静电，特别是从高绝缘性材料的内包装筒中抽取火工品时，其上静电电位较高。另外技术检查有时涉及裸弹，静电源与火工品之间存在直接耦合途径，应采取以下防静电措施：

(1) 现场地面为防静电地面，泄漏电阻小于 $10^6\Omega$ 。如达不到要求，应铺设临时导电胶板并可靠接地。

(2) 现场工作台应铺设防静电胶板并接地，对角向磨光机等金属机具应接地，非金属机具应控制运转速度，防止静电积聚。

(3) 现场人员穿防静电鞋袜、防静电工作服。

(4) 从塑料、玻璃钢、铝塑包装筒中抽取弹药时，应缓慢抽出；剥离弹药上的油纸条、防潮胶套等，动作不宜过猛；人员活动也应注意不要过快。

(5) 现场相对湿度应保持在 60% 以上。

3) 火工品转运环境

对于火工品转运作业中的设备应分情况处理：固定的金属设备应直接静电接地；固定的非金属静电导体或静电亚导体材料容器、设备应采取静电间接接地；对于可移动的设备应根据情况采取确实可靠的静电接地措施，这是十分重要的环节。

通常情况下，尽量不要采取临时性接地措施，这是因为对已带电的设备接地瞬间会发生放电，反而带来安全隐患。但是，对于装有发射药的药箱等容器只能作临时接地，这时，应注意以下几点：接地支线应为多股胶合裸线，与药箱连接采用鳄鱼夹；必须在作业前接好地线；在装箱完毕后必须经过 5min 以上的静止时间，再拆除地线。对于叉车等搬运机具，可用导电轮胎实现间接静电接地，但静电泄漏电阻应符合要求。

静电接地与通常意义上的接地有很大差异，国内外许多规范、标准中都没有严格区分接地电阻与静电接地电阻及静电泄漏电阻，根据 GJB 2527—85 的定义，静电接地是指物体通过导电、防静电材料或其制品与大地在电气上可靠连接，确保静电导体电位接近大地零电位。

静电接地分为直接静电接地和间接静电接地。通过金属导体使物体静电接地称为直接静电接地，简称“直接接地”或“接地”。直接接地的方法是用接地支线与接地干线相连，再把接地支线与被接地的金属机具或金属容器等相连，接地干线、支线、接地体连接必须可靠，宜采用焊接或螺栓连接。当静电危险场所存在多个彼此相距很近的小型金属物体时，可将这些金属物体串联起来，然后再将其其中一个物体进行直接接地，这种金属物体间的连接方式称为跨接或搭接，跨接的

目的是使导体与导体之间及导体与大地之间都保持等电位，防止导体之间及导体与大地之间有电位差。此外，当有杂散电流时，跨接还可为其提供泄漏通道，避免发生静电放电事故。

如果静电危险场所存在的物体不是金属导体而是静电导体或静电亚导体，则不能采用直接接地，而应通过非金属导体、防静电材料等使物体接地，称为间接静电接地，简称“间接接地”。例如：工作台上的火工器件通过台上的防静电胶板和接地装置实现间接接地；人穿防静电鞋站在防静电地面上，是间接接地；火工品转运车尾部拖着一条防静电材料制成的拖地胶带，或者通过防静电轮胎与地面紧密接触，这也是间接接地。静电间接接地施工时用导电胶液将静电导体或静电亚导体表面局部或全部与金属导体紧密黏合，然后再将金属导体进行直接接地。在进行间接接地时，非金属的静电导体或静电亚导体与金属导体紧密黏合的面积应大于 20cm^2 ，同时使这两者之间的接触电阻尽量小（接触电阻一般应控制在数欧姆以下）。

在防静电实际工作中，静电泄漏电阻是评价静电间接接地良好程度的主要依据，静电泄漏电阻和静电接地电阻在概念和量值上是有区别的。在一般情况下，静电泄漏电阻值不等于接地电阻值，也不等于静电接地电阻值。仅当金属物体进行直接接地时，因金属物体本身的电阻可以忽略不计，静电泄漏电阻才近似等于静电接地电阻。

6.3.2 射频影响及效应

6.3.2.1 射频电磁环境

电磁环境主要因素有自然环境因素和人为环境因素两大类：自然环境因素包括雷电电磁辐射源、静电电磁辐射源、太阳系和星际电磁辐射源、地球和大气层电磁场等；人为环境因素包括各种电磁发射系统和工频电磁辐射系统等，会产生不同频率、不同强度的电磁辐射。

随着微电子技术、电火工品技术的发展及其在火工品中的应用，电磁环境效应对电子线路和电火工品的影响加大。其中火帽、雷管等起爆装置的感度非常高：火花式电雷管的起爆能量一般为 $10^{-2}\sim 10^{-1}\text{ mJ}$ ，LD-3 火花式电雷管的 100%发火能仅为 0.188mJ 。电子技术从电子管元器件发展到大型集成电路以来，元件的耐受能量已由 $100\sim 10000\text{mJ}$ 降至 $10^{-5}\sim 10^{-3}\text{ mJ}$ ，这些都对火工品的可靠性和安全性提出了更高的要求。

功率强大的雷达、定向电台，以及电磁脉冲武器产生的射频，能引起电爆装置早炸或使系统产生严重失效。当前使用的电火工品大约 90% 属热桥丝型的，其起爆是靠埋在炸药中的桥丝受热来实现，在射频能量作用下，桥丝耦合的干扰能量将产生焦耳热。一连串的电磁干扰脉冲作用产生热积累效应。焦耳热和热积累效应使桥丝温升并传递给周围药剂。当药剂达到发火点时，将引起电火工品意外

发火，若射频耦合引起的感生电动势，进入桥丝，超过其最小安全电流时，就有可能引起弹药爆炸；而当干扰能量较小时，由于热积累的作用，药剂将会发生慢分解，可能引起电火工品的性能改变。实际上，是否会引起电火工品发火，取决于所施加射频能量的强度、频率和电火工品的射频阻抗、射频感度等。试验研究表明，各种电磁危害源对智能弹药等高新技术弹药的影响，主要通过能量的传导耦合、辐射耦合模式发生作用。其作用机理可以概括为以下 3 个方面：

（1）热效应。静电放电和高功率电磁脉冲产生的热效应一般是在纳秒或微秒量级完成的，是一种绝热过程。作为点火源和引爆源，瞬时引起易燃、易爆气体或电火工品爆炸，也可使系统中的微电子器件、电磁敏感电路过热，造成局部热损伤，电路性能变坏或失效，甚至导致库存物资燃烧爆炸。

（2）射频干扰和“浪涌”效应。强电磁脉冲及其“浪涌”效应对弹药还会造成硬损伤。既可能使器件或电路的性能参数劣化或完全失效，也可能形成累积效应，埋下潜在危害，使电路或设备的可靠性降低。

（3）强电场效应。电磁危害产生的强电场（特别是静电场）不仅可金属导线间介质击穿，致使电路失效，而且会形成潜在性损伤，对弹药火工品工作可靠性造成影响。

电磁脉冲或高功率微波对武器装备的破坏准则描述如下：当脉冲功率密度达到 $0.01\sim1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时，雷达和通信设备无法正常工作。当脉冲功率密度达到 $0.01\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以上时，可对武器装备造成“硬损伤”，其中，当脉冲功率密度达到 $0.01\sim1\text{W}/\text{cm}^2$ 时，可使电子系统功能混乱、计算机死机，雷达、通信、导航等系统的电子元件烧毁；当脉冲功率密度达到 $1\sim100\text{kW}/\text{cm}^2$ 时，能够在瞬间摧毁无电磁防护的目标，引爆地雷、导弹和各类电火工品。

电磁脉冲或高功率微波的电磁辐射能量作用到弹药火工品上时，通过“前门”或“后门”耦合，使电磁脉冲能量以传导方式或辐射方式作用于电子部件和电爆火工品，致使弹药的作战效能下降或完全失效。作用结果主要取决于弹药中个别部件的电磁敏感度和电磁脉冲作用时间内每个部件接收到的电磁脉冲能量。电磁脉冲引起弹药火工品故障或起爆的最小电磁脉冲能量见表 6-11。

从上述试验数据看出，强电磁辐射的电磁脉冲能量足以将弹药中的电爆装置引爆，从而导致弹药在强电磁环境下丧失生存能力。

表 6-11 引起弹药火工品故障或起爆的最小电磁脉冲能量

名 称	最小能量/J	故 障	备 注
爆炸螺栓	6×10^{-3}	引爆	8A 爆炸螺栓
雷管	2×10^{-5}	引爆	35WN8 电雷管
燃料气体	3×10^{-3}	引爆	丙烷空气混合气

电磁波对火工品的影响主要以电流的形式通过脚线作用于桥丝换能元，使桥丝换能元产生感应电流导致热积累。由火工品的发火机理可知，当火工品在受到电刺激后的响应特性及桥丝及其四周装药的温度分布与许多难以量化的电热参数有关，当温度积累不能很快达到点火药和起爆药起爆温度，就可能在接近于发火点的温度下保持相当长的时间，由于高温变质效应可能使点火药和起爆药在发火前性能发生变化，从而改变火工品的发火性能。这种情况对钝感型电热火工品的影响可能会引起感度变化，进而引起瞎火；而对低发火能量火工品的影响可能是意外发火。

在研究电磁环境对火工品作用机理时，要通过对火工品元器件、装配状态及性能比较分析，确定受电磁波影响较为突出的主要特征参数。从电磁环境对火工品的作用过程来看，当不同状态的火工品处于电磁场中时，通常情况下火工品的引线起到天线（通常为窄带天线）的作用，可以从电磁环境中拾取一定的电磁能量，引线拾取的能量通过火工品电极塞馈入火工品换能元，换能元获得的电能通过能量转换成火工药剂的化学能，当此化学能足够大时就会导致火工品作用。

电磁环境中火工品响应过程如图 6-5 所示。

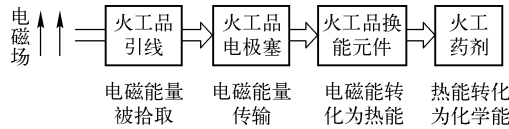


图 6-5 电磁环境中火工品响应示意图

6.3.2.2 射频耦合分析

火工品主要由管壳、加强帽、电极塞、桥丝、起爆药和猛炸药等组成。火工品引线在电磁场中起到接收天线的作用，并从环境电磁场中拾取电磁辐射能量，当火工品拾取的电磁辐射能量大于其发火能量时，就会使火工品发火，导致危害。

不同的工作状态或布线条件，火工品接收到的电磁辐射能量大小不同，差异也很大。火工品接收电磁辐射能量的大小，与电磁辐射场场强和火工品线路所形成的天线结构、天线的取向及火工品与天线发射机之间的距离等几个因素有关。

根据天线理论中的弗里斯传输方程，有

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{A_{et} \cdot A_{er}}{d^2 \cdot \lambda^2} \quad (6-1)$$

式中 P_r ——接收天线接收到的电磁辐射功率，W；

P_t ——发射天线的输出功率，W；

A_{er} ——接收天线的有效孔径， m^2 ；

A_{et} ——发射天线的有效孔径， m^2 ；

d ——发射天线与接收天线间的距离, m;

λ ——发射天线辐射电磁波的波长, m。

$$P_r = \bar{P} \times A_{er} \quad (6-2)$$

式中 \bar{P} ——接收天线处的平均功率密度, W/m^2 。

从式(6-2)可看出, 将火工品等效成一定结构的天线, 就可得到电热火工品拾取电磁辐射功率。

当火工品在两根脚线通常是相互缠绕短路在一起时, 采用等效成图 6-6 的方式进行分析。



图 6-6 电热火工品等效分析框图

火工品在上述状态下等效天线的有效孔径的表达式为

$$L/\lambda < 1/2 \text{ 时} \quad A_e = \frac{4.67 \times 10^4 A^2}{\pi \lambda^2 R_r} \quad (6-3)$$

$$L/\lambda \geq 1/2 \text{ 时} \quad A_e = \frac{1.64 \lambda^2}{4\pi} \quad (6-4)$$

式中 A ——环路面积, m^2 ;

R_r ——火工品电磁辐射阻抗的电阻分量, Ω ;

λ ——电磁波波长, m。

火工品最大接收频率(谐振频率)与脚线长度 L 有关, 并按公式(6-5)计算:

$$f_0 = \frac{300}{4L} \text{ (MHz)} \quad (6-5)$$

发射机天线在火工品接收天线处所形成电磁辐射场的功率密度为

$$\bar{P} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (6-6)$$

式中 P_t ——发射机输出功率, W;

G_t ——发射天线的增益;

d ——电热火工品与发射机天线之间的距离, m;

\bar{P} ——电热火工品所在位置的功率密度, W/m^2 。

图 6-7 为简化后的两种典型脚线放置方式的电热火工品结构简图。

图中 L 是脚线长度, d 是脚线直径, a 是脚线间距, b 是换能元距壳体表面距离, E 是电场方向, θ 是电场方向夹角。

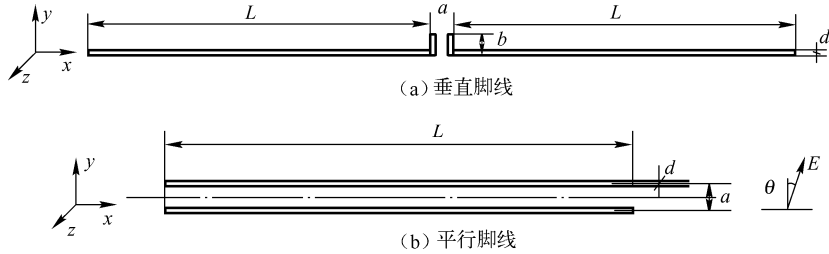


图 6-7 典型脚线放置方式电热火工品结构简图

在仿真分析模型建立中, 火工品脚线结构按实际几何模型进行建模, 由于换能元尺度很小, 其具体几何模型暂不考虑, 在仿真计算中考虑其阻抗效应, 将其简化为有一定电阻的元件。计算简化模型如图 6-8 所示。

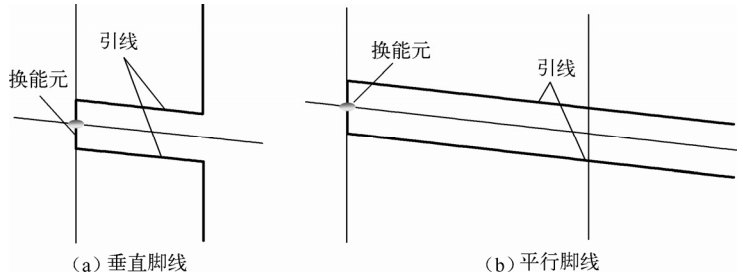


图 6-8 计算简化模型

在电磁波作用下, 对火工品 (含引线) 响应开展仿真研究, 分别对垂直脚线和平行脚线两种情况进行仿真分析。

1. 垂直脚线

在电场强度为 70V/m 、电磁波频率为 $120\sim 2000\text{MHz}$ 情况下, 对由电磁耦合产生的电磁感应电流进行了仿真分析。电磁波方向为 x 方向, 电场极化方向为 y 方向。脚线长度 $L=360\text{mm}$, 脚线直径 $d=0.6\text{mm}$, 脚线间距 $a=5\text{mm}$, 换能元与壳体表面距离 $b=10\text{mm}$ 。脚线材料选为可伐合金, 介电常数 $\epsilon=9.4$, 磁导率 $\mu=1.0$, 换能元件电阻 $R=10\Omega$ 。

由图 6-9 可以看出, 最大感应电流出现在频率大约在 200MHz 处, 这和理论谐振频率 ($f=300/4L=208.3\text{MHz}$) 基本一致。随着频率的增加, 感应电流减小, 但在大约奇数倍谐振频率 ($f=600, 1000, 1400, 1850\text{MHz}$) 也出现峰值极点, 但总体趋势是逐渐减小, 验证了关于感应电流峰值与谐振频率存在对应关系的试验与理论结果。

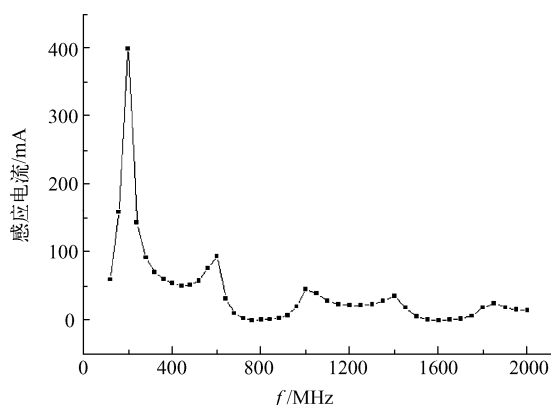


图 6-9 垂直脚线时最大感应电流和频率的关系

2. 平行引线

在电场强度为 70V/m、电磁波频率为 120~2000MHz 情况下，对由于电磁耦合产生的电磁感应电流进行了仿真分析。平行脚线时最大感应电流和频率的关系如图 6-10 所示。

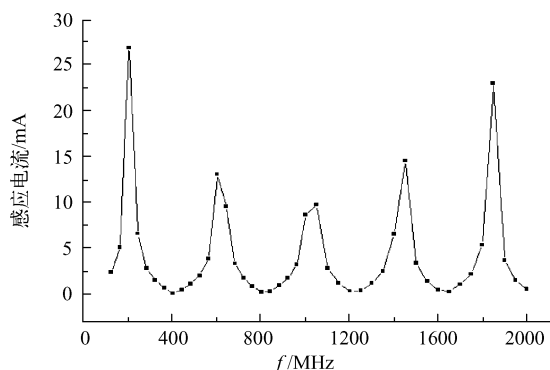


图 6-10 平行脚线时最大感应电流和频率的关系

由图 6-10 可以看出，当引线平行放置时，感应的峰值感应电流随电磁波频率的变化而变化，出现多峰值情况，但峰值电流较垂直脚线形式约小 1 个数量级，验证了垂直脚线为最不利条件的结论判断。此外，结合电热火工品结构谐振频率的估算，可以看出峰值基本出现在奇数倍谐振频率处。

6.3.2.3 电磁防护

在导弹火工品操作检测环境中，电磁干扰的抑制和防护是电磁兼容性设计的核心内容，具体的设计方案要考虑设备预期的电磁环境，包括干扰源的种类、频

带、强度、耦合途径及接收器的敏感度等，从干扰源、耦合途径和敏感火工器件入手，综合采用空域、时域电磁防护方法。

1. 空域防护

空域防护技术是指针对来自空间的电磁干扰的防护技术，即采取完善和合理的屏蔽措施，将干扰电磁场在空间上与接收器隔离开，使干扰电磁场在到达接收器时强度降至最低限度，从而达到控制干扰的目的。空域防护是对空间辐射干扰源最有效、最基本的控制方法。屏蔽，包括将辐射干扰电磁场封闭在金属屏蔽体内，不让它辐射出去，或将辐射强度大大削弱，也包括将接收器或接收系统屏蔽起来，使屏蔽体外面的电磁场不能进入屏蔽体，因而降低对导弹火工品造成的影响。

使用涂有电磁屏蔽涂料的盖布或帐篷，对待测火工品进行遮盖，或在野战阵地建立电磁屏蔽防护的火工品操作环境。这类涂料主要由电磁材料和成膜物质组成，电磁材料包括高导电性材料（如 Ca、Ag 等）、高导磁性材料（如铁氧体、Fe 及 Co 等）和导电磁性材料（如 Ni、合金等），成膜物质则包括环氧树脂、丙烯酸树脂、酚醛树脂等。根据 GJB 2406—96《军用电磁屏蔽涂料通用规范》的要求，如果将电磁屏蔽材料覆盖于 1~2mm 的 ABS 工程塑料板上，涂层厚度 30~60 μ m 时，屏蔽效能应达到 60~80dB。

根据 GJB 54/Z—94《系统预防电磁能量效应的设计和试验指南》规定，屏蔽的实施应注意以下几个要点：

- (1) 应使用铜、铝等良导体来屏蔽高频电场，以获得理想的反射损耗。
- (2) 应使用铁、锰等磁性材料来屏蔽低频磁场，以获得理想的吸收损耗。
- (3) 对屏蔽电场而言，任何材料只要能支撑其身重量、厚度就足够了。
- (4) 对于薄膜屏蔽，材料厚度大于波长的四分之一，屏蔽效能显著增加。
- (5) 对壳体和电缆采用多重屏蔽，既能提高屏蔽效能，又能扩大屏蔽的频率范围。
- (6) 对屏蔽体所有开口和断点都应进行处理，减小屏蔽效能损失，还应考虑防化学腐蚀。
- (7) 系统设计允许时，尽量采用连续对接或搭接焊缝，搭接时表面必须清洁，不允许有不导电氧化层，尽量保持接缝处连接面之间的紧密接触。
- (8) 导电衬垫、弹簧销、截止波导、金属网、通气百叶窗和导电玻璃等都是保持外壳屏蔽性能的主要零件，合理使用能收到良好效果。
- (9) 应综合考虑接地、搭接、滤波等措施，以降低对屏蔽的要求。

2. 时域防护

当干扰非常强、不易受抑制，但仅在一定时间段内阵发存在时，通常采用时间回避的方法，即在时间上避开干扰的作用期间，这种方法称为时域防护技术。采用时间回避的时域防护方法有两种：一是主动时间回避法；二是被动

时间回避法。

1) 主动时间回避法

如果事先知道干扰的出现时间，而且在干扰的出现时间在时域上很容易分开，就可以采用主动时间回避方法。

2) 被动时间回避法

当电磁干扰是阵发的，而且不能预先确定出现时间，往往要采用被动时间回避，以避免火工品操作过程中出现危险。

本章小结

本章从导弹火工品的储存、转运、操作等典型勤务处理环节，对影响火工品安全的因素进行了详细分析，并介绍防范安全风险的主要做法。

思考题

1. 试总结在储存条件下影响火工品安全的主要因素。
2. 在火工品转运过程中，振动对火工品有哪些影响？
3. 静电对火工品作用形式有哪些？
4. 简述防静电、防射频的主要措施和方法。

附录 A 中英导弹火工品常用词汇对照表

注：每组第一行为中文，第二行为英文，以中文汉语拼音排序

安定性	爆破效应	磁引信
stability	blast effect	magnetic fuze
安全系数	爆破战斗部	常规战斗部
safety factor	blast warhead	conventional warhead
安全电流	爆热	冲击波
safety current	heat of explosion	shockwave
奥克托金	爆容	冲击波比冲量
octogen	explosive specific volume	specific impulse of shock wave
半穿甲战斗部	爆速	冲击波波阵面
semi-armor piercing warhead	detonation velocity	shock front
半球型头部	爆温	冲击波超压
semispherical nose	explosion temperature, detonation temperature	overpressure of shock, wave
半预制破片	爆压	overpressure
controlled fragment, semi-prefabricated fragment	detonation pressure	冲击波效应
半主动式引信	爆炸	effect of blast (shock) wave
semiaactive fuze	explosion, blast, burst	冲击感度
半导体桥火工品	爆燃	impact sensitivity, shock wave sensitivity
semiconductor bridge explosive device	deflagration	冲击片雷管
保险	爆炸桥丝式电雷管	slapper detonator
unarming	exploding bridge wire electric detonator	触发引信
保险机构	爆炸螺栓	contact fuse,
safety and arming device	explosive bolt	impact fuze
爆发点	被动式引信	传爆系统
deflagration point	passive fuze	explosive train
爆轰	不完全燃烧	传爆药
detonation	incomplete combustion	booster charge,
		lead charge,

booster explosive	single compound explosive	多级导弹
传爆药柱	点火	multiple-stage missile
booster explosive	igniting	多聚能装药战斗部
催化剂	点火发动机	multi-shaped charge warhead
catalyst	rocket type igniter	多选择引信
单质炸药	点火管	multi-selection fuze
single-base explosive	igniter	二次破片
单质起爆药	点火器	secondary fragment
single compound primary explosive	igniter	二硝基重氮酚
弹头	点火具	dinitrodiazophenol
warhead	igniter	发火
导爆药柱	点火压力	ignition
lead explosive	ignition pressure	发火机构
导电药式电雷管	点火药	ignition device
conductive mixture electric detonator	first fire composition , igniting	反导弹导弹
导弹	composition	anti-missile missile
guided missile	底火	反辐射导弹
导弹武器系统	primer	anti-radiation missile
guided missile weapon system	电爆活门	反舰导弹
导弹系统	explosive valve	anti-ship missile
missile system	电点火管	反雷达导弹
导火索	electric squib	anti-radar missile
blasting cord	电雷管	反坦克导弹
导爆索	electric detonator	anti-tank missile
detonating cord	电点火头	防空导弹
导爆管	electric igniter	anti-aircraft missile
detonating tube	叠氮化铅	非触发引信, 近炸引信
导爆药	lead azide	proximity fuze
lead explosive	短程导弹	复合推进剂
地(岸)舰导弹	near-range missile	composite propellant
ground (shore) -to-ship missile	钝感炸药	复盐起爆药
地地导弹	insensitive high explosive	complex primary explosive
ground-to-ground missile	钝化黑索金	复合战斗部
地空导弹	desensitized hexogen	complex warhead
ground-to-air missile	多普勒无线电引信	复合引信
单质炸药	Doppler radio fuze	compound fuze

改性双基推进剂	kill probability	flame front
modified double-base propellant	毁伤区、攻击区	混合炸药
感度	kill zone	composite explosive
sensitivity	毁伤区纵深	红外引信
高能炸药	depth of kill zone	infrared fuze
high explosive	毁伤效果	机械引信
隔板	destroy effectiveness	mechanical fuze
diaphragm, shaper	混合炸药	激光引信
隔离机构	mixed explosive, explosive mixture	激光引信
interrupter	混合起爆药	集束战斗部
光学引信	mixed primary explosive	cluster warhead
optical fuze	火箭	技术阵地
共沉淀起爆药	rocket	prelaunching operation position
co-precipitation primary explosive	火工品	舰地导弹
过氯酸铵	primer, initiator,	ship-to-ground missile
ammonium perchlorate	explosive device	舰舰导弹
过氧化氢	火工品作用时间	ship-to-ship missile
hydrogen peroxide	functioning time explosive device	舰空导弹
焓	火工品可靠性	ship-to-air missile
enthalpy	reliability of explosive device	浇铸
含铝炸药	火工品输出	casting
aluminized explosive	output of explosive device	解除保险
毫米波引信	火工烟火技术	arming
millimeter wave fuze	technique of explosive device and	金属射流
核战斗部	pyrotechnics	metallic jet
nuclear warhead	火工药剂	近程导弹
黑火药	explosive initiator material	short-range missile
black powder	火花式电雷管	静电感度
黑索金	sparkle detonator	static electric sensitivity
hexogen	火帽	静电引信
红外引信	primer, igniting cap	static electric fuze
infrared fuze	火焰雷管	拒爆
化学安定度	flame detonator	failure of detonation
chemical stability	火焰感度	聚能爆破战斗部
	sensitivity to flame	shaped-charge blast warhead
毁伤概率	火焰峰	聚能效应

shaped charge effect	临界起爆能量	mean life
聚能战斗部	critical initiating energy	平均无故障工作时间
shaped charge warhead , hollow	灵敏度	mean time between failure
charge warhead	sensitivity	破片
军用炸药	灵巧引信	fragment
military explosive	smart fuze	破片飞散角
可靠度	铝粉	dispersion angle of fragment
reliability	aluminum powder	破片杀伤动能
可靠度分配	脉冲雷达引信	kinetic energy of damage of fragment
reliability appointment	pulse radar fuze	破片效应
可靠度预测	脉冲多普勒无线电引信	fragmentation effect
reliability prediction	pulsed Doppler radio fuze	破片战斗部
可靠度增长	锚形药柱	fragmentation warhead
reliability growth	anchor grain	起爆
空地导弹	猛度	initiation,
air-to-ground missile	brisance	detonating
空舰导弹	猛炸药	起爆药
air to ship missile	brisant explosive , detonation	primary explosive
空空导弹	explosive	起动活门
air-to-air missile	密封	start valve
空面导弹	seal	气压引信
air to surface missile	密封装置	barometric fuze
扩爆药柱	sealing device	起爆感度
auxiliary booster grain	面空导弹	detonation sensitivity
苦味酸	surface-to-air missile	潜地导弹
picric acid	面面导弹	submarine-to-ground missile
雷管	surface-to-surface missile	潜舰导弹
detonator	目标	submarine-to-ship missile
连续杆	target	潜空导弹
continuous rod	目标毁伤	submarine-to-air rocket
连续杆环	damage of target	切割索
continuous rod hoop	目标易损性	explosive cutting cord
连续杆战斗部	target vulnerability	侵彻效应
continuous rod warhead	奥克托今	penetration effect
链式反应	octagon	侵蚀燃烧
chain reaction	平均寿命	erosive burning

氢弹头	nitrogen tetroxide	explosive
hydrogen warhead , fusion warhead	塑性炸药	瞎火
燃气发生器	plastic explosive	misfire
gas generator	碎甲效应	吸湿性
燃烧	spall effect	hygroscopicity
combustion, burning	碎甲战斗部	线性聚能战斗部
燃烧面积	HESH warhead , spall warhead	linear shaped-charge warhead
burning surface area , burning area	太安	相容性
燃速	pentrite	compatibility
burning rate	特屈儿	硝化甘油
燃料空气炸药	tetryl	nitroglycerine
fuel-air explosive	梯恩梯	硝化纤维素
燃速系数	trinitrotoluene	nitrocellulose
burning rate constant	梯恩梯当量	硝酸
热感度	TNT equivalent	nitric acid
heat sensitivity	推进剂相容性	硝胺炸药
热安定性	propellant compatibility	nitramine explosive
thermal stability	完全燃烧	星形药柱
热载荷	complete combustion	star grain
thermal load	万向着发机构	性能指标
三硝基间苯二酚铅	omnidirectional percussion device	performance index
lead styphnate	威力	殉爆
四氮烯	explosive power , destructive	sympathetic explosion
tetrazene	capability	烟火剂
杀伤战斗部	微电子火工品	pyrotechnic composition
kill warhead , fragmentation	micro-electric explosive device	延期机构
warhead	维修	delay mechanism
闪点	maintenance	延期药盘
flashpoint	无线电引信	power ting
熵	radio fuze	延期药
entropy	无线电制导	delay composition
时间引信	radio guidance	延期雷管
time fuze	无烟推进剂	delay detonator
瞬发雷管	smokeless propellant	氧化剂
instantaneous detonator	无起爆药电雷管	oxidizer
四氧化二氮	electric detonator without primary	药型罩

cavity liner, metal cone	binder	active fuze
药柱	炸药	主装药
grain, charge	explosive	main charge
曳光弹	战斗部	储存寿命
flare	warhead armament	storage life
液体炸药	战斗部舱	周炸引信
liquid explosive	warhead compartment	ambient fuze
引爆	战斗部毁伤半径	装定
initiation	kill radius of warhead, kill distance of	setting
引信	radius	装药
fuze, fuse	战斗部壳体	charge
引信可靠作用距离	case, casing	撞击感度
reliable fuze-function distance	战斗部杀伤区	impact sensitivity
引信天线	lethal area of warhead	锥柱形药柱
fuze antenna	战斗部威力	conical grain
引信最佳启动时刻	effectiveness of warhead, warhead	着发机构
optimum moment of fuze actuation	power	percussion device
引战配合	战斗部系统	灼热桥丝式电雷管
coordination of fuze and warhead	warhead system	hot bridge wire electric detonator
乙炔化合物	战斗部效应	子母式战斗部
acetylide	warhead effect	warhead of shrapnel, explosive-
有效毁伤半径	战斗部装填系数	pellet warhead
effective kill distance(radius)	charging coefficient of warhead	自毁
有效载荷	战术技术要求	self-destruction
payload	operational requirement and	自毁机构
有翼式导弹	specification	self-destructor
winged missile	针刺雷管	综合毁伤
预制破片	stab detonator	complex damage
preformed fragment, prefabricated	针刺药	组合火工品
fragment	stab composition	combined explosive device
原子战斗部	指令引信	做功火工品
atom warhead, fission warhead	command fuze	explosive actuated device
炸点	钟表机构	作动筒
point of burst	clock mechanism	actuator
黏合剂	主动式引信	

附录 B 火工品安全国家军用标准列表

- B.1 GJB 4377—2002 《弹药、导弹用火工品安全性要求》
- B.2 GJB 2001—1994 《火工品包装、运输、储存安全要求》
- B.3 GJB 5120—2002 《废火药、炸药、弹药、引信及火工品处理、销毁与储运安全技术要求》
- B.4 GJBz 20296—95 《海军导弹及其设备安全性要求》
- B.5 GJB 3653.3—2002 《火工品检验验收规则 底火》
- B.6 GJB 3653.4—2002 《火工品检验验收规则 点火具和传火具》
- B.7 GJB 3653.5—2002 《火工品检验验收规则 雷管》
- B.8 GJB 3653.7—2002 《火工品检验验收规则 导爆管和传爆管》
- B.9 GJB 357—87 《空—空导弹最低安全要求》
- B.10 GJB 900—90 《系统安全性通用大纲》
- B.11 GJB 373A—97 《引信安全性设计准则》
- B.12 GJB 573A—98 《引信环境与性能试验方法》
- B.13 GJB 1244—91 《电引信和电子引信安全设计准则》
- B.14 GJB 6237—2008 《聚黑-14 传爆药规范》
- B.15 GJB 736.8~12—90 《火工品试验方法》
- B.16 GJB 344A—2005 《钝感电起爆器通用规范》
- B.17 GJB 345A—2005 《引信用电起爆爆炸元件的鉴定试验》
- B.18 GJB 1307A—2004 《航天火工装置通用规范》
- B.19 GJB 1579—1993 《电起爆的电爆分系统通用规范》
- B.20 GJB 2865—1997 《火箭和导弹固体发动机点火系统安全设计准则》
- B.21 GJB 2034—1994 《航天飞行器系统电爆分系统的安全要求和试验方法》
- B.22 GJB 4078—2000 《火工品药剂相容性试验程序》
- B.23 GJB 786—1989 《预防电磁场对军械危害的一般要求》
- B.24 GJB 900—90 《系统安全性通用大纲》

参 考 文 献

- [1] 沈如松. 导弹武器系统概论[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [2] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [3] 王凯民, 温玉全. 军用火工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [4] 夏建才, 刘丽梅, 等. 火工品制造[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [5] 陈福梅, 等. 火工品原理与设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
- [6] 李国新, 程国元, 焦清介. 火工品试验与测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [7] 王莹, 彭和平, 等. 美国现代火工品产品汇编[G]. 西安: 中国兵器第二一三研究所, 1991.
- [8] 徐振相, 秦士嘉, 等. 火工品可靠性技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996.
- [9] 李桂茗, 等. 火工品原理基础[D]. 上海: 华东工业学院, 1988.
- [10] 刘伟钦, 等. 火工品制造[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [11] 李国良, 朱国清, 等. 火炸药与火工品[D]. 北京: 军械技术学院, 1984.
- [12] 刘士杰. 火工品[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [13] 崔占忠, 宋世和, 徐立新. 近炸引信原理[M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [14] 丁兰芳, 等. 飞航导弹电气系统设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [15] 宋贵宝, 沈如松, 周文松, 等. 武器系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [16] 徐廷学, 邓会光, 李启明. 导弹装备综合保障理论与方法[M]. 北京: 海潮出版社, 2004.
- [17] 黄瑞松. 飞航导弹工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2004.
- [18] 杨建军. 地空导弹武器系统概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [19] 金永德, 等. 导弹与航天技术概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.
- [20] 张培成, 何武城, 等. 导弹技术词典——引信[M]. 北京: 宇航出版社, 1985.
- [21] 蒋浩征, 俞明义, 等. 导弹技术词典——战斗部[M]. 北京: 宇航出版社, 1986.
- [22] 空军装备系列丛书编审委员会. 新概念武器[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.